



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

## TOPOLOGICKÉ OPTIMALIZACE V TECHNICKÉ PRAXI

TOPOLOGICAL OPTIMIZATION IN TECHNICAL PRACTICE

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Mazoch

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.

BRNO 2019

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektrotechnická výroba a materiálové inženýrství**

Ústav elektrotechnologie

**Student:** Bc. Jan Mazoch

**ID:** 173700

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2018/19

**NÁZEV TÉMATU:**

## Topologické optimalizace v technické praxi

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se se subtraktivní a aditivní metodou výroby. Prostudujte problematiku numerického modelování topologických optimalizací v systému ANSYS a SolidWorks. Popište, jak se liší jejich přístup. Na zadaném modelu proveďte topologickou optimalizaci a model realizujte za pomoci 3D tisku. Porovnejte úsporu materiálu.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 4.2.2019

**Termín odevzdání:** 21.5.2019

**Vedoucí práce:** Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá problematikou 3D tisku a využití topologické optimalizace pro úpravu tvaru 3D tisknutého výrobku. První část této práce obecně popisuje subtraktivní technologii výroby, konkrétně CNC obráběcí stroje, a aditivní technologii výroby, kterou využívá 3D tisk. Druhá část této práce popisuje topologickou optimalizaci jako takovou a konkrétní metody, které jsou při topologické optimalizaci využívány. Ve třetí a ve čtvrté části této práce jsou představeny moduly topologické optimalizace softwarů Ansys a SolidWorks. V páté části této práce jsou možnosti topologické optimalizace 3D tisknutého výrobku demonstrovány na konkrétních příkladných provedeních designového osvětlení a nosníku.

## **Klíčová slova**

Topologická optimalizace, 3D tisk, aditivní technologie výroby.

## **Abstract**

Master's thesis deals with an issue of 3D printing and of using a topological optimization for editing a shape of a 3D printed product. First part of this thesis provides a general description of a subtractive manufacturing technology, specifically its use in CNC milling machines, and of an additive manufacturing technology which is used in 3D printing. Second part of this thesis describes the topological optimization per se and specific methods which are used in the topological optimization. In the third and the fourth part of this thesis, topological optimization modules of software Ansys and SolidWorks are described. In the fifth part of this thesis, the topological optimization capabilities for 3D printed product on a specific embodiments of a design lightning and a cross-beam are demonstrated.

## **Keywords**

Topological optimization, 3D printing, additive manufacturing.

Bibliografická citace:

MAZOCH, Jan. Topologické optimalizace v technické praxi. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/119336>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Petr Vyroubal.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci na téma „Topologické optimalizace v technické praxi“ vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou v práci citovány a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv, osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne **15. května 2019**

.....

podpis autora

## Poděkování

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce Ing. Petru Vyroubalovi, Ph.D. za účinnou pedagogickou a odbornou pomoc a velmi cenné rady při zpracování této práce. Dále bych rád poděkoval mé přítelkyni a rodině za podporu při studiu.

V Brně dne **15. května 2019**

.....

podpis autora

# Obsah

1	Subtraktivní a aditivní technologie výroby.....	8
1.1	Subtraktivní technologie výroby.....	8
1.2	Aditivní technologie výroby .....	9
2	Topologická optimalizace.....	13
2.1	Úvod do topologické optimalizace .....	13
2.2	Fáze procesu topologické optimalizace .....	14
2.3	Metody topologické optimalizace.....	18
3	Topologická optimalizace v softwaru Ansys Workbench .....	25
3.1	Strukturální analýza .....	25
3.2	Příprava topologické optimalizace.....	28
3.3	Vyhodnocení výsledků topologické optimalizace .....	33
4	Topologická optimalizace v softwaru SolidWorks .....	38
4.1	Strukturální analýza .....	38
4.2	Příprava topologické optimalizace.....	38
4.3	Vyhodnocení výsledků topologické optimalizace .....	49
5	Příkladná provedení topologické optimalizace v softwarech Ansys a SolidWorks .....	51
5.1	První příkladné provedení topologické optimalizace .....	51
5.2	Druhé příkladné provedení topologické optimalizace .....	59
6	Závěr .....	61
7	Bibliografie .....	63
8	Seznam obrázků .....	66
9	Seznam tabulek.....	69

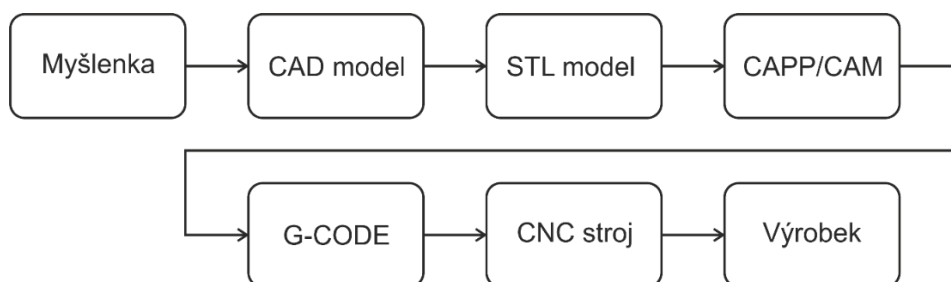
# ÚVOD

S rozvojem 3D tisku přicházejí zároveň i snahy o přenesení této technologie výroby z laboratorního prostředí do průmyslového prostředí. Aby k takovému přenesení však mohlo dojít a tato technologie výroby se dala použít pro výrobu větších či menších sérií, je nutné snížit jednotkovou cenu za výrobek. Ke zlevnění výroby používající 3D tisk může docházet různými způsoby, například zlevněním samotných 3D tiskáren, zlevněním materiálů nebo úpravou tvaru 3D tisknutého výrobku. Právě úpravou samotného tvaru 3D tisknutého výrobku při zachování všech požadavků například na tuhost nebo rezonanční frekvenci se zabývá topologická optimalizace 3D tisknutého modelu, jež bude popisována v následujících kapitolách. V následujících kapitolách budou také popsány subtraktivní a aditivní technologie výroby, přičemž aditivní technologií výroby je právě technologie výroby 3D tiskem.

# 1 SUBTRAKTIVNÍ A ADITIVNÍ TECHNOLOGIE VÝROBY

## 1.1 Subtraktivní technologie výroby

Subtraktivní technologie výroby spočívá v řízeném odebrání materiálu z určitého polotovaru typicky kvádrovitého, krychlovitého, válcovitého nebo jiného obdobného tvaru. Stroje pro tuto technologii výroby jsou obecně nazývány obráběcí stroje. Obráběcí stroj je tedy strojem pro třískové obrábění materiálu.



*Obrázek 1.1 Diagram tvorby výrobku subtraktivní technologií*

Princip tvorby výrobku subtraktivní technologií může být popsán například diagramem na obrázku 1.1. Prvním krokem je vždy myšlenka konstruktéra, jak by daný výrobek mohl vypadat. Konstruktor tuto myšlenku následně převede na CAD model prostřednictvím některého ze softwarů pro tvorbu CAD modelů, například SolidWorks. CAD model musí být převeden do síťového modelu ve formátu STL. Následně dochází k nastavení procesů samotné výroby (CAPP – computer-aided proces planning; CAM – computer-aided manufacturing). Toto nastavení spočívá mimo jiné v napozicování dílu ve výrobním prostředí CNC stroje, naslicování (slicing – převedení objektu do tenkých vrstev), nastavení výrobních parametrů a vygenerování dráhy nástrojů. Dalším krokem je vygenerování tzv. G-CODE, což je program ve specializovaném programovacím jazyku G-CODE určeném pro řízení číslíkových strojů (NC strojů) a tedy i CNC strojů. Vytvořený G-CODE se následně nahraje do CNC stroje, který z polotovaru postupným odebráním materiálu vytvoří výsledný výrobek.

Dle pracovního rozsahu můžeme obráběcí stroje dělit na univerzální, speciální a jednoúčelové. Univerzální obráběcí stroje umožňují provádět různé druhy operací s různými rozsahy rozměrů. Mezi takovéto stroje můžeme zařadit například univerzální hrotové soustruhy, konzolové frézky nebo CNC automaty.

CNC automaty jsou počítačem řízené obráběcí stroje, které umožňují obrábění vždy minimálně ve třech osách, často však ve více osách, kdy je umožněn například i náklon obráběcího nástroje do stran, což umožňuje vytvoření složitých struktur.



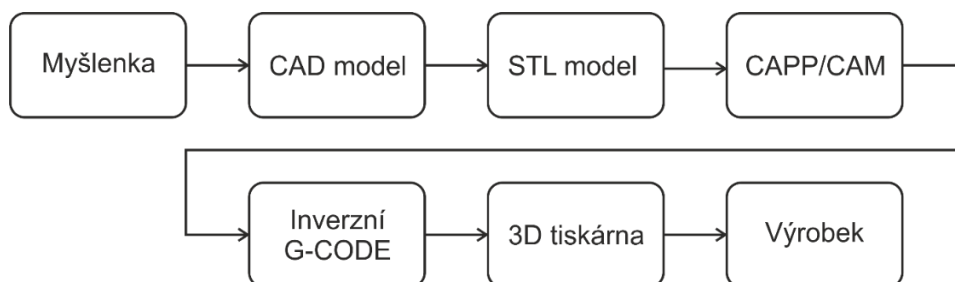


Obrázek 1.2 Čtyř-osý CNC automat [1].

Nevýhodou těchto CNC automatů je však fakt, že na rozdíl od strojů využívajících aditivní technologie neumožňují vytváření struktur zahrnujících například různé dutiny, případně různě se překrývající prvky. Toto limituje dosažení co nejlepšího poměru tuhost-váha, jakého je možné dosáhnout pomocí aditivních technologií.

## 1.2 Aditivní technologie výroby

Aditivní technologií výroby je technologie výroby, při které dochází k výrobě 3D objektů postupným přidáváním materiálu po jednotlivých vrstvách. Počátek aditivních technologií můžeme nalézt v osmdesátých letech dvacátého století, kdy byly vynalezeny první dvě metody pro 3D tisk plastových modelů za pomoci reaktoplastů s UV vytvrzováním. V roce 1989 si pak S. Scott Crump nechal prostřednictvím své společnosti patentovat „Zařízení a metodu pro vytváření tří-dimenzionálních objektů“ (č. patentu: US5121329), čímž do roku 2009 zabránil rychlejšímu vývoji 3D tisku, jelikož principy popsané v tomto řešení jsou využívány dodnes. [2]



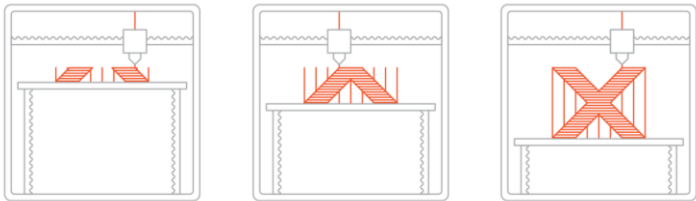
Obrázek 1.3 Diagram tvorby výrobku aditivní technologií

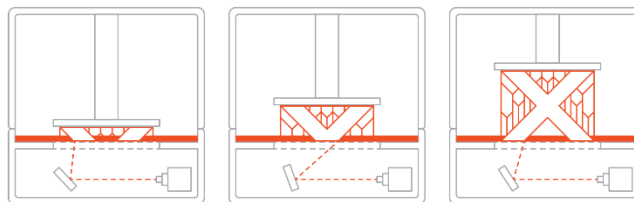
Princip tvorby výrobku aditivní technologií může být popsán například diagramem na obrázku 1.3. Prvním krokem je, stejně jako u subtraktivní technologie, vždy myšlenka konstruktéra, jak by daný výrobek mohl vypadat, s tím rozdílem, že jak je popsáno detailněji níže, konstruktér není při vymýšlení možné konstrukce výrobku, která bude vyráběna 3D tiskem, tolik omezován výrobními možnostmi. Konstruktér tuto myšlenku následně převede na CAD model prostřednictvím některého ze softwarů pro tvorbu CAD modelů, například SolidWorks. CAD model musí být převeden do síťového modelu ve formátu STL. Následně dochází k nastavení procesů samotné výroby (CAPP – computer-aided proces planning; CAM – computer-aided manufacturing). Toto nastavení spočívá mimo jiné v napozicování dílu ve výrobním prostředí 3D tiskárny, naslicování (slicing – převedení objektu do tenkých vrstev), nastavení výrobních parametrů a vygenerování dráhy nástrojů. Dalším krokem je vygenerování tzv. inverzního G-CODE, což je opět program ve specializovaném programovacím jazyku G-CODE určeném pro řízení číslíkových strojů (NC strojů) a tedy i 3D tiskáren. Přídomek „inverzní“ pouze určuje, že se jedná o G-CODE pro aditivní technologii, tedy obrácený princip oproti subtraktivní technologii. Vytvořený G-CODE se následně nahraje do 3D tiskárny, která z polotovaru postupným přidáváním materiálu vytvoří výsledný výrobek.

Výhodou aditivní technologie je, jak již bylo naznačeno v předcházející kapitole, možnost tisku takových struktur, které by nebylo možné vytvořit z jednoho kusu, například kvůli zakroucení nebo dutému středu výrobku, a bylo by tak nutné použít například svařování, čímž by mohlo dojít ke ztenčení určitých částí, které by pak byly náchylnější na poškození. Další výhodou, která se sice stala běžnou praxí v celém průmyslu, ale ve 3D tisku se projevuje o to více, je odpadnutí nutnosti vývoje stylem pokus-omyl, kdy v současnosti je možné pomocí mnoha různých simulačních programů nasimulovat chování různých skupin součástek. Na základě této simulace je pak možné dané součástky vytisknout na 3D tiskárnách, a tím zrychlit proces vývoje nového produktu, jelikož odpadá nutnost vytváření například různých vstřikovacích forem nebo složitého obrábění. V závislosti na těchto výhodách je tak možné přicházet s řadou nových řešení, která by v minulosti nebyla realizovatelná a inženýři je tak ani nebrali v potaz. [3]

V současnosti je známo deset způsobů 3D tisku, které využívají různé konkrétní technologie. V tabulce 1.1 níže je možné vidět tři z nich, které jsou používány nejčastěji.

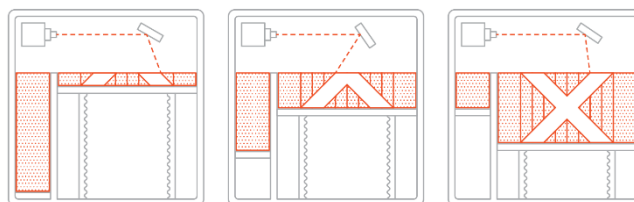
Tabulka 1.1 Způsoby 3D tisku [4]

Způsob	Technologie	Materiály	Přesnost tisku	Výhody	Nevýhody	Typické využití
<b>Vytlačování materiálu</b>	Fused Deposition Modeling (FDM)	Termoplastické filamenty – PLA, ABS, PET, TPU	$\pm 0,5$ mm (při použití trysky 0,4 mm)	Plně barevný, možnost využití více materiálů	Křehké, nevhodné pro mechanické části, pro vizuální účely dražší než SLA/DLP	Prototypy přípravků a uchycení, jednoúčelové přípravky (osazovací přípravky)
 <p>Obrázek 1.4 Vytlačování materiálu [4]</p>						
<b>VAT polymerizace</b>	Stereolitografie (SLA), Direct Light Processing (DLP)	Fotopolymery – standardní, lité, transparentní, vysokoteplotní	$\pm 0,15$ mm	Hladký povrch, možnost jemných detailů	Křehké, nevhodné pro mechanické části	Prototypy pro injekční vstřikování polymerů, šperky, zubní aplikace, naslouchátka



Obrázek 1.5 VAT polymerizace [4]

<b>Laserové spékání práškového materiálu (Powder Bed Fusion)</b>	Plasty: Selektivní laserové sintrování (SLS)  Kovy: Přímé laserové kovové sintrování (DMLS), Selektivní laserové tavení (SLM), Tavení elektronovým paprskem (EBM)	Termoplastický prášek (Nylon 6, 11, 12), Kovový prášek hliníku, titanu a nerezové oceli	$\pm 0,3 \text{ mm}$ (SLS)  $\pm 0,1 \text{ mm}$ (SLM, DMLS, EBM)	Funkční součástky, dobré mechanické vlastnosti, komplexní tvary, nejsilnější (kovové)	Delší doba tvorby, dražší než FDM pro funkční aplikace (SLS), malé rozměry (kovy), nejdražší výroby vůbec (kovy)	Funkční součástky, duté konstrukce, malosériová výroba, zubařství a zdravotnictví obecně
--	---	---	---	---	--	--



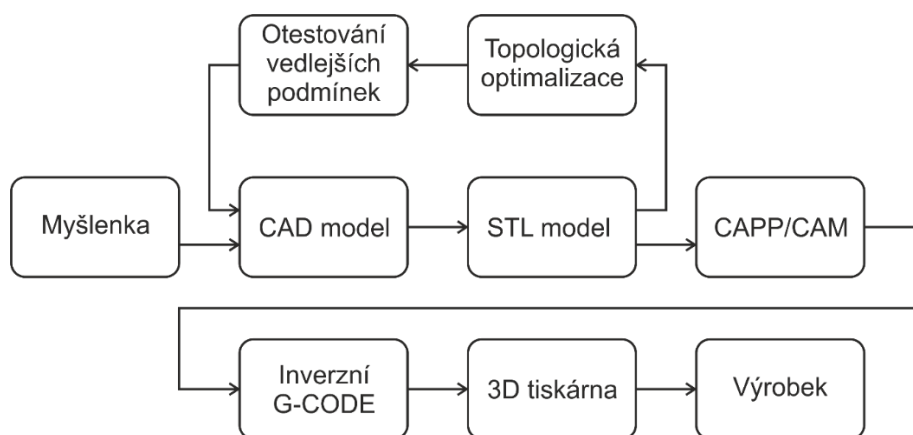
Obrázek 1.6 Laserové spékání práškového materiálu [4]

## 2 TOPOLOGICKÁ OPTIMALIZACE

### 2.1 Úvod do topologické optimalizace

Topologická optimalizace tak, jak je popisována v této práci, je relativně nový obor, jehož rozmach je způsoben postupným uvolňováním zažitých konvencí při navrhování nových konstrukcí v důsledku stále většího rozvoje aditivní technologie výroby. Při provádění topologické optimalizace dochází k úpravě geometrie objektu tak, aby výsledný objekt splňoval požadavky účelovosti vyjádřené formou tzv. vedlejších podmínek a zároveň aby došlo typicky k maximálnímu snížení hmotnosti objektu, tedy co největšímu odběru materiálu. V této kapitole bude dále popsán postup topologické optimalizace, kde budou popsány jednotlivé fáze celého procesu a dále budou popsány různé metody samotné optimalizace.

Pokud bychom využili diagramu na obrázku 1.3 popisujícího proces výroby aditivní technologií a zahrnuli bychom do něj topologickou optimalizaci vyráběného výrobku, dostali bychom diagram zobrazený na obrázku 2.1. Topologická optimalizace vstupuje do procesu po bloku vytvoření STL modelu, který je vstupem pro topologickou optimalizaci. V bloku topologické optimalizace následně proběhne první až šestá fáze procesu topologické optimalizace dle následující podkapitoly. Výsledkem tohoto bloku bude tedy topologicky optimalizovaný STL model, který v první řadě v bloku otestování vedlejších podmínek otestujeme, zda splňuje stanovené vedlejší podmínky, což je například podmínka maximálního napětí v materiálu nebo maximálního posunutí určitého bodu sítě, a to vše při působení tzv. vnějších podmínek, tedy například zatížení určité části výrobku vnější silou. Pokud optimalizovaný STL model splňuje požadované vnější podmínky, vložíme jej zpět do bloku vytvoření CAD modelu, kde můžeme provést drobné designové úpravy, jako je například vyhlazení povrchu. Pokud by optimalizovaný STL model nesplňoval požadované vnější podmínky, můžeme se vrátit zpět do bloku topologické optimalizace a pokusit se úpravou vhodných proměnných dosáhnout vhodně optimalizovaného modelu. Upravený CAD model následně převedeme v bloku vytvoření STL modelu na STL model, který je vhodné znovu otestovat na splnění vedlejších podmínek při působení vnějších podmínek. Pokud daný STL model vedlejší podmínky splňuje, můžeme dále pokračovat v procesu výroby. Pokud by daný STL model vedlejší podmínky nesplňoval, je opět nutné se vrátit do bloku návrhu CAD modelu a model upravit.



Obrázek 2.1 Diagram tvorby výrobku aditivní technologií s využitím topologické optimalizace

## 2.2 Fáze procesu topologické optimalizace

### I. fáze – Poznávání vnějších podmínek

Poznávání vnějších podmínek je prvním krokem procesu topologické optimalizace. Během tohoto kroku dochází k poznávání různých vnějších podmínek působících na objekt. Takovými vnějšími podmínkami může být například tlak vyvíjený na určitou část objektu nebo tah vyvíjený na určitou část objektu. Soubor těchto a dalších vlastností je pak výsledkem tohoto kroku a označujeme ho veličinou  $\mathbb{P}_s$ .

### II. fáze – Stanovení kritérií pro ukončení optimalizace

V kroku stanovení kritérií pro ukončení optimalizace, jak už z názvu vyplývá, jsou stanovena kritéria, po jejichž splnění dojde k zastavení samotné optimalizace, tedy k dosažení optimálního stavu.

Jedna z možných definic optimální konstrukce stanovuje, že „optimálním uspořádáním konstrukce (tj. její forma a rozměry) je takové uspořádání, které je dle jistým způsobem zavedeného hlediska nejlepší z třídy možností, které jsou přijatelné při daných vedlejších podmínkách.“ [5].

Jedním z nejčastěji používaných kritérií je poměr hmotnosti daného objektu po optimalizaci ku hmotnosti původního objektu. V optimalizačních softwarech bývá toto kritérium často označováno jako „Best Stiffness to Weight Ratio“, což lze přeložit jako nejlepší poměr tuhosti ku váze objektu. V určitých případech může být dalším kritériem například cena, což může znamenat, že další snižování hmotnosti by mohlo vést k neúměrnému nárůstu ceny

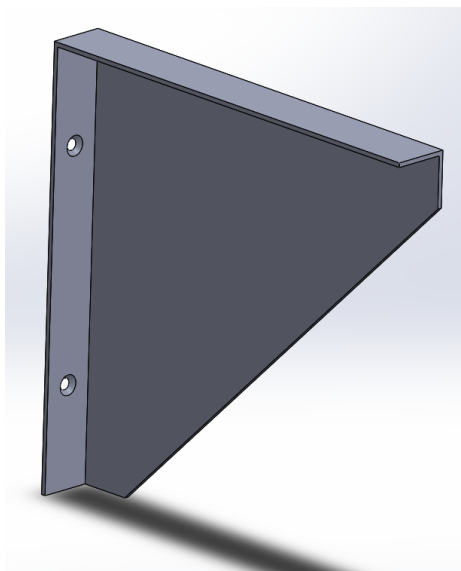
za odebraný kilogram a další snižování váhy se tak již nevyplatí. Dalšími kritérii mohou být například tuhost objektu nebo vlastní frekvence.

Zvolená kritéria vyjádřená konkrétní číselnou hodnotou nazýváme návrhové proměnné a zapisujeme je jako sloupcový vektor  $\mathbf{x}_N$ .

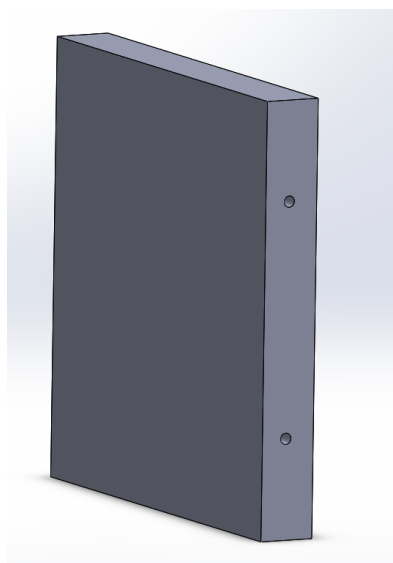
### **III. fáze – Specifikace formy a volba návrhových proměnných**

Formou, která je v těchto fázích procesu topologické optimalizace popisována, je jinak řečeno referenční oblast, tedy část objektu nebo celý objekt, ve kterém dochází k samotné topologické optimalizaci. Krok stanovení formy, ve které dochází k topologické optimalizaci, je jeden z nejdůležitějších kroků celého procesu topologické optimalizace, jelikož od něj se budou odvíjet všechny ostatní parametry.

Při úloze topologické optimalizace, jak je popisována v této práci, je nejvhodnějším přístupem, při kterém dostaneme ty nejvhodnější výsledky, navržení takové formy, která je tvarově co nejméně omezována. Zjednodušeným příkladem může být držák poličky. Jednou z možností je definovat tvar na základě určitých konstruktérských znalostí a zkušeností tak, jak je to možné vidět na obrázku 2.2, a stanovit si, že referenční oblastí je pouze boční, přibližně trojúhelníková stěna, na základě čehož bude optimalizace prováděna pouze na této boční stěně. Další možnost, jak definovat tvar, je viditelná na obrázku 2.3, kde jsme pouze určili rozměry stykové plochy držáku poličky s poličkou a uchycovací body, pomocí nichž je držák poličky ukotven ke stěně. Při takovéto definici je referenční oblastí celý objem držáku pouze s určitými omezeními, kdy je například stanoveno, že vrchní plocha zůstane neoptimalizována. Pomocí takovéto definice referenční oblasti je obvykle možné dosáhnout „optimalizovanější“ topologie, jelikož samotný optimalizační proces není tolik omezován.



*Obrázek 2.2 Možný tvar držáku poličky*



*Obrázek 2.3 Možný tvar držáku poličky*

Jakmile je specifikována forma, je dále nutné provést definici tří typů tzv. návrhových proměnných. Návrhovými proměnnými prvního typu jsou rozměrové proměnné, jež jsou označovány  $x_r$ . Rozměrové proměnné definují například šířku a tloušťku různých rovinných prvků. Návrhovými proměnnými druhého typu jsou tvarové proměnné, jež jsou označovány  $x_t$ . Tvarové proměnné definují například počet a umístění uzlů konstrukce. Návrhovými proměnnými posledního, třetího, typu jsou materiálové proměnné, jež jsou označovány  $x_m$ . Materiálové proměnné, jak již z názvu vyplývá, definují vlastnosti materiálu formy, jež jsou důležité pro stanovení možností optimalizace, například tedy pružnost, hustota apod. Všechny tři typy návrhových proměnných pak vyjadřujeme, jak již bylo řečeno výše, pomocí sloupcového vektoru  $x_N$ .



## IV. fáze – Stanovení vedlejších podmínek

Další velmi důležitou fází procesu topologické optimalizace je stanovení vedlejších podmínek. Vedlejšími podmínkami mohou být například minimální tloušťka materiálu v určité části, maximální přípustné napětí v materiálu nebo maximální posuv určitého bodu při působení vnějších podmínek. Vedlejší podmínky jsou vyjádřeny nerovnicemi, kdy hodnoty daných veličin jsou menší nebo větší než určitá mezní podmínka. Tyto podmínky tak slouží pro zajištění, že například napětí v materiálu nepřeroste určitou mez, při níž by mohlo dojít k poškození celého objektu. Dalším možným příkladem využití těchto podmínek, v případě, že vedlejší podmínkou je podmínka maximálního posuvu, je limitace posuvu obvykle krajního bodu, u něhož je možné předpokládat největší posuv. Mezní posuv zmíněného krajního bodu může znamenat maximální možnou výchylku při výrobní činnosti stroje, při níž je stále možné považovat výrobek za vyhovující, tedy například maximální výchylka ramene automatizovaného svařovacího stroje při natažení ramene do maximální možné vzdálenosti. Vedlejší podmínky jsou tedy zpravidla zapisovány jako geometrické vedlejší podmínky, tedy

$$\mathbf{b}_l \leq \mathbf{x}_b \leq \mathbf{b}_u,$$

kde  $\mathbf{b}_l$  představuje spodní mez proměnných vedlejších podmínek,  $\mathbf{b}_u$  představuje horní mez proměnných vedlejších podmínek a  $\mathbf{x}_b$  představuje vektor proměnných vedlejších podmínek.

## V. fáze – Sestavení matematického modelu fyzikálně zjednodušené technické úlohy

Při simulacích chování objektu v průběhu samotné topologické optimalizace se projevují nejen námi zvolené návrhové proměnné, ale také proměnné, jež jsou nazývány analytické proměnné. Tyto analytické proměnné označujeme  $\mathbf{x}_A$  a vyjadřují například tenzor napětí, změnu tvaru, vlastní frekvenci apod. Tyto proměnné tak slouží k hlubší analýze optimalizovaného objektu. Analytické proměnné spolu s návrhovými proměnnými obvykle tvoří tzv. vektor proměnných úlohy, označovaný  $\mathbb{E}^P$ .

## **VI. fáze – Výběr vhodné metody topologické optimalizace a provedení samotné topologické optimalizace**

V této fázi je prováděn výběr vhodné metody topologické optimalizace a samotná topologická optimalizace na základě stanovené formy a podmínek stanovených v I. až V. fázi procesu topologické optimalizace. Různé metody, pomocí nichž je prováděna samotná topologická optimalizace, budou diskutovány v následující podkapitole 2.3.

## **VII. fáze – Technická interpretace získaného řešení**

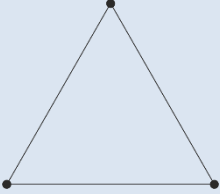
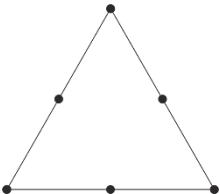
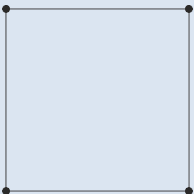
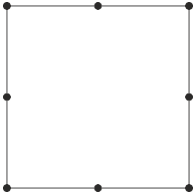
Poslední fází celého procesu topologické optimalizace je fáze technické interpretace získaného řešení. V této fázi dochází v různých návrhových programech typicky ke krokům ověření optimalizovaného objektu, že nepřekračuje žádnou ze zadaných vnějších nebo vedlejších podmínek, dále pak k úpravám optimalizovaného objektu tak, aby splňoval určité požadavky dané výrobními možnostmi.

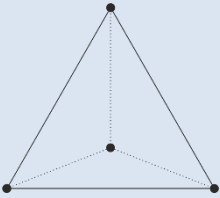
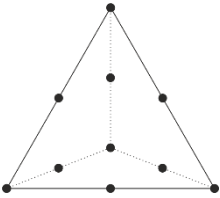
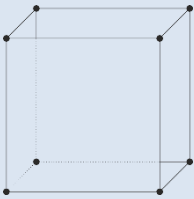
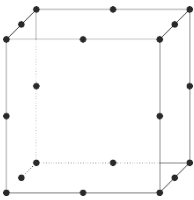
### **2.3 Metody topologické optimalizace**

Topologická optimalizace tak, jak je popisována v této práci, patří do kategorie tzv. zobecněné optimalizace tvaru označované GSO z anglického názvu „Generalized Shape Optimization“. U takovéto optimalizace dochází zároveň jak k optimalizaci samotné topologie, tak k návrhu tvaru. Při řešení se ve většině programů používaných v současné době využívá metody konečných prvků.

Metoda konečných prvků je numerickou metodou, která se od rozvoje počítačů využívá pro řešení fyzikálních problémů, jakými jsou proudění, deformace a podobně. Metoda konečných prvků spočívá v diskretizaci spojitého systému, přičemž výsledkem diskretizace je soustava tzv. konečných prvků, které jsou navzájem spojeny jedním nebo více uzlovými body, takzvanými nody. Diskretizací jsou pro každý uzlový bod získány algebraické rovnice pro posunutí ve všech směrech a z nich se následně určí napětí a deformace v každém bodě. Veškeré tyto hodnoty se následně sloučí, a získají se tak celkové hodnoty posunutí, napětí a deformace jednotlivých částí zkoumaného objektu. [6] Výběr některých tvarů konečných prvků je možné vidět v tabulce 2.1, přičemž nejpresnějších výsledků je možné dosáhnout s prvky, které jsou kvadraticky interpolované. Důsledkem této přesnosti je však zvýšená výpočetní náročnost a z těchto důvodů se tak v topologické optimalizaci využívají méně přesné ale výpočetně méně náročnější lineární prvky. [7]

Tabulka 2.1 Výběr možných tvarů konečných prvků

Prvek	Název	Dimenze	Počet uzlů	Interpolace
 <p>Obrázek 2.4 Trojúhelník</p>	Trojúhelník	2D	3	Lineární
 <p>Obrázek 2.5 Kvadratický trojúhelník</p>	Kvadratický trojúhelník	2D	6	Kvadratická
 <p>Obrázek 2.6 Čtyřúhelník</p>	Čtyřúhelník	2D	4	Lineární
 <p>Obrázek 2.7 Kvadratický čtyřúhelník</p>	Kvadratický čtyřúhelník	2D	8	Kvadratická

 <p><i>Obrázek 2.8 Tetrahedron</i></p>	Tetrahedron	3D	4	Lineární
 <p><i>Obrázek 2.9 Kvadratický tetrahedron</i></p>	Kvadratický tetrahedron	3D	10	Kvadratická
 <p><i>Obrázek 2.10 Hexahedron</i></p>	Hexahedron	3D	8	Lineární
 <p><i>Obrázek 2.11 Kvadratický hexahedron</i></p>	Kvadratický hexahedron	3D	20	Kvadratická

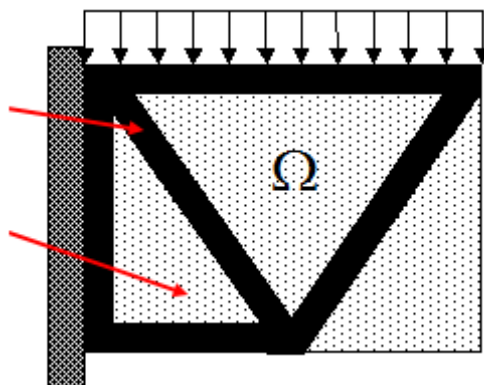
Jednotlivé metody využívající metodu konečných prvků rozdělujeme podle použitých elementů na metody využívající ISE – izotropní pevný či prázdný element; ASE – anizotropní pevný či prázdný element; a ISEP – izotropní pevný, prázdný či pórovitý element. Síť tvořená ISE elementy využívá elementy tvořené jedním materiálem o známých vlastnostech, přičemž materiál může být vybrán ze skupiny vícera materiálů. Síť tvořená ASE elementy využívá elementy, u nichž jsou stanoveny určité mechanické vlastnosti, které se ale odlišují element od

elementu. Síť tvořená ISEP elementy využívá elementy tvořené prázdným prostorem a zároveň jedním nebo více materiály o známých vlastnostech.

V této práci budou diskutovány pouze metody využívající izotropních pevných či prázdných elementů. Těmito metodami jsou metoda pevné izotropní mikrostruktury s penalizací (SIMP), metoda optimální mikrostruktury s penalizací (OMP) a metoda neoptimálních mikrostruktur (NOM).

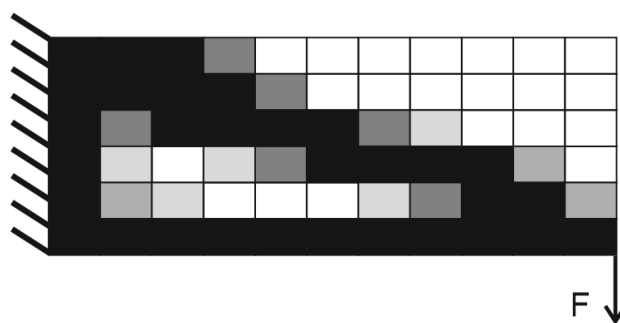
## Metoda SIMP

Metoda SIMP je v současnosti jedna z nejpoužívanějších metod pro řešení topologické optimalizace. Metoda SIMP využívá pevnou izotropní mikrostrukturu s penalizací pro střední hustoty. Podle Bendsoeho má „*optimalizace tvaru v tom nejjobecnějším nastavení tvořit určení tvaru v každém bodu nezávisle na tom, zda se v něm materiál nachází či ne.*“ [8] V podstatě to tedy znamená, že hustota by měla být vyjádřena pouze dvěma stavy, což by ale přinášelo obrovské množství možností. Takovéto rozložení hustot je možné vidět například na obrázku 2.12, kde je černou barvou zobrazena plná hustota materiálu a bílou barvou je zobrazena nulová hustota materiálu.



Obrázek 2.12 Optimalizované rozložení hustot v zatíženém nosníku. [9]

Vhodným východiskem pro snížení náročnosti výpočtu by bylo využívání spojitě se měnící hustoty, což je i základ metody SIMP. Elementy mohou tedy nabývat hodnot hustoty od nuly, přes takzvané porézní prvky, nebo-li elementy se střední hustotou, až po hustotu plného materiálu. V některých publikacích je pro zjednodušení hustota plného materiálu uváděna poměrem, tedy jako 1. Takovéto rozložení hustot je možné vidět například na obrázku 2.13, kde je černou barvou zobrazena plná hustota materiálu, bílou barvou je zobrazena nulová hustota materiálu a různými odstíny šedi je zobrazena střední hustota materiálu.



Obrázek 2.13 Rozložení hustot v zatíženém nosníku

Podle ISE však mohou být elementy pouze plné nebo prázdné a výskyt mezilehlých hodnot komplikuje výpočet, proto metoda SIMP dále popisuje možnost penalizace mezilehlých hodnot. Penalizace může nabývat hodnot od jedné do pěti, přičemž penalizace jedna znamená bez penalizace. Penalizací se však úloha stává nekonvexní a nemusí dojít ke globálnímu optimu. Obvykle se proto postupuje tak, že je postupně zvyšována hodnota penalizace, než se většina těchto mezilehlých hodnot přiblíží jedné z mezních hodnot.

Mezi hlavní výhody metody SIMP patří výpočetní efektivnost, jelikož pro jeden element existuje pouze jediná proměnná. Další výhodou je masivnost, jelikož je použitelná pro jakoukoliv kombinaci vedlejších podmínek. Na rozdíl od níže diskutované metody NOM může být penalizace volně volena tak, abychom docílili výpočetně vhodného výsledku. Metoda dále nevyžaduje použití vyšší matematiky, a proto je zároveň teoreticky snadná. V případě, že je penalizace rovna jedné, je úloha konvexní a řešení je zároveň globálním optím a díky postupnému zvyšování penalizace se předpokládá, že nedojde k tomu, že se řešení příliš vzdálí od globálního optima. Poslední velkou výhodou je, že metoda SIMP nevyžaduje homogenizaci mikrostruktury. [10]

## Metoda OMP

Metoda OMP využívá optimální mikrostrukturu s penalizací pro střední hustoty. Využitím optimální mikrostruktury je myšleno, že tato metoda nejprve nalezne optimální řešení pro každý konečný element na základě určitých podmínek, kterými mohou být například vedlejší podmínky. Na rozdíl od metody SIMP, kde máme pouze jedinou proměnnou pro každý element, máme v případě dvourozměrných úloh pro každý element tři proměnné – dvě pro hustotu materiálu a třetí pro orientaci – a v případě trojrozměrných úloh dokonce pět proměnných – tři pro hustotu materiálu a dvě pro orientaci. Nevýhodou metody OMP a použití mikrostruktur je nedostatečná penalizace, kdy se výsledek nepřiblíží dostatečně ISE, což znamená, že obsahuje velké množství středních hustot.

Mezi nevýhody tedy patří velké množství proměnných, a tím i zhoršená efektivita výpočtů. Další nevýhodou je nutnost použití vyšší matematiky při zavádění nových podmínek návrhu. Metoda OMP vede vždy k nekonvexní úloze a vyžaduje homogenizaci mikrostruktury. [10]

## Metoda NOM

Metoda NOM využívá neoptimální nebo skoro optimální mikrostruktury bez dodatečné penalizace. Samotná neoptimálnost však zaručuje určitou penalizaci. Počet proměnných používaných v této metodě je obvykle nižší než u metody OMP, přesto však stále vyšší než u metody SIMP. Další nevýhodou je fixní stupeň „penalizace“, což se nepotkává s ISE, jelikož se není možné zbavit středních hustot. Stejně jako metoda OMP je i metoda NOM nekonvexní a vyžaduje homogenizace. [10]

## Srovnání metod topologické optimalizace

Tabulka 2.2 Srovnání metod topologické optimalizace

	SIMP	OMP	NOM
<b>Dodatečná penalizace</b>	ANO	ANO	NE
<b>Nezbytná homogenizace</b>	NE	ANO	ANO
<b>Počet proměnných v jednom elementu</b>	1	3 (2D), 5 (3D)	>1
<b>Možnost volby penalizace</b>	ANO	ANO	NE
<b>Výhody</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Výpočetní efektivnost</li> <li>• Masivnost</li> <li>• Volitelná penalizace</li> <li>• Řešení v globálním optimu nebo blízko</li> <li>• Nevyžaduje homogenizaci</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Volitelná penalizace</li> </ul>	-
<b>Nevýhody</b>	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velký počet proměnných</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velký počet proměnných</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nedostatečná penalizace</li> <li>• Vyšší matematika</li> <li>• Nekonvexní úloha</li> <li>• Vyžaduje homogenizaci</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Chybějící penalizace</li> <li>• Vyšší matematika</li> <li>• Nekonvexní úloha</li> <li>• Vyžaduje homogenizaci</li> </ul>
--	--	--	---



# 3

## TOPOLOGICKÁ OPTIMALIZACE V SOFTWARE ANSYS WORKBENCH

V této kapitole bude popsána topologická optimalizace v softwaru Ansys Workbench, důraz tedy bude kladen především na modul topologické optimalizace. V této kapitole bude zároveň také zmíněn modul strukturální analýzy, který tvoří nedílnou součást topologické optimalizace a je zároveň vstupem pro samotný modul topologické optimalizace.

Ansys Workbench je analytický software společností Ansys, jejíž historie sahá do roku 1970, kdy byla ještě pod jiným názvem založena Johnem Swansonem. Podstata softwaru spočívá v analýze problémů z různých oblastí techniky pomocí metody konečných prvků. [11] Software v sobě sdružuje různé moduly pro řešení problémů v oblasti elektřiny, magnetismu, mechaniky nebo proudění, přičemž tyto moduly mohou být různě vzájemně propojovány.

### 3.1 Strukturální analýza

Modul strukturální analýzy je jeden z modulů mechaniky. Pomocí tohoto modulu je možné analyzovat různé mechanické parametry zkoumaného objektu. Takovými parametry jsou například posun určité části, napětí nebo stres. Získané parametry různých objektů pak můžeme v některých případech využít například pro správné nastavení limitních hodnot vedlejších podmínek topologické optimalizace.

Prvním krokem při provádění strukturální analýzy je definování materiálů použitých v různých částech geometrie. Toto definování provádíme v sekci modulu zvané „Engineering Data“. Velké množství materiálů je již definováno, avšak je možné nastavit i vlastní materiály. Pokud nastavujeme vlastní materiál, tak musíme pro správnou funkčnost strukturální analýzy nastavit alespoň hustotu, Poissonovo číslo a Youngův modul pružnosti v tahu, případně modul pružnosti ve smyku.

Dalším krokem je přiřazení zkoumané geometrie. Poté již následuje samotné nastavení parametrů strukturální analýzy, což se děje v podprogramu „Mechanical“, do kterého se dostaneme prostřednictvím sekcí „Model“, „Setup“, „Solution“ nebo „Results“.

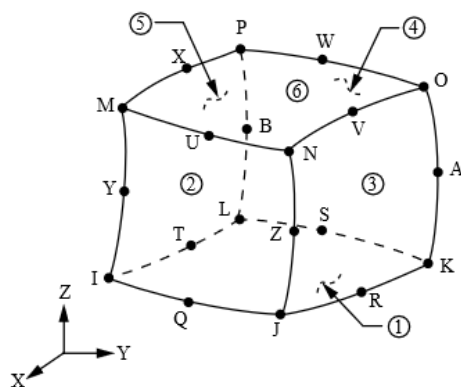
V podprogramu „Mechanical“ nejprve přiřadíme jednotlivým částem geometrie dříve definované materiály. Dále následuje vytvoření sítě. Tato síť by měla být dostatečně jemná, jelikož s její pomocí bude pak prováděna topologická optimalizace, tedy v případě, kdy by síť nebyla dostatečně jemná, by ani nemohlo být dosaženo dostatečně kvalitních výsledků. Kvalitu této sítě je možné zjistit z grafu „Skewness“, který se nachází v nastavení „Mesh“, „Quality“ a „Mesh Metric“. Tento graf nám říká, jak moc deformované (např. šikmé) jsou konečné prvky,

například v případě tetrahedronů by měl být ideální prvek poskládán z rovnoramenných trojúhelníků. Důvodem je, že následné výpočtové rovnice počítají s tím, že tvar prvků se bude blížit ideálnímu. Hodnocení různých hodnot, s jakými se konečné prvky blíží ideálním, je možné vidět v tabulce 3.1, přičemž většina konečných prvků by měla být na úrovni „dobrý“ a vyšších, avšak obvykle je u 3D objektů určitý počet konečných prvků na nižších úrovních, než je úroveň „dobrý“. [12]

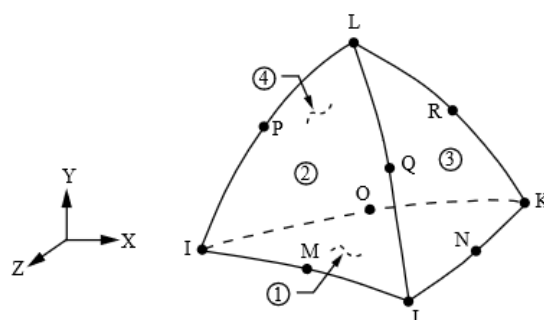
*Tabulka 3.1 Kvalita konečných prvků v grafu „Skewness“ [12]*

Hodnota	Kvalita
1	Naprosto nevhodné
$0.9 - < 1$	Špatné
$0.75 - 0.9$	Spíše špatné
$0.5 - 0.75$	Ucházející
$0.25 - 0.5$	Dobré
$> 0 - 0.25$	Výborné
0	Ideální

Jak již bylo popsáno v kapitole 2.3, vhodnějšími konečnými prvky pro účely topologické optimalizace jsou prvky lineární, které nejsou tak přesné, ale zároveň nejsou ani tak výpočetně náročné. Přesto však využívá modul strukturální analýzy softwaru Ansys v případě nastavení automatického výběru mezi lineárními a kvadratickými prvky mnohem přesnějších, ale také výpočetně náročnějších kvadratických tetrahedronů, resp. hexahedronů, označených jako SOLID187, resp. SOLID186.



Obrázek 3.1 Konečný prvek SOLID186 [13]



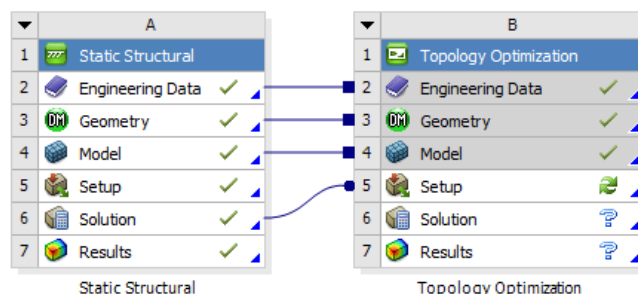
Obrázek 3.2 Konečný prvek SOLID187 [14]

Po vytvoření dostatečně kvalitní sítě následuje zadání vnějších podmínek analýzy. Vnější podmínkou je typicky směr působení gravitace, směr působení různých sil nebo určení různých spojení, například pevné spojení s dalším, v modelu blíže nespecifikovaným prvkem. Následuje provedení samotné strukturální analýzy.

Výsledky strukturální analýzy je možné zobrazit pomocí funkcí pro zobrazení daných parametrů na určité ploše, části geometrie nebo na celé geometrii, nebo pomocí funkcí pro zobrazení daných parametrů v určitém bodě, typicky posunutí daného bodu. Takto získané parametry je, jak již bylo řečeno výše, možné použít pro správné nastavení vedlejších podmínek topologické optimalizace. Tohoto se využívá zejména v případě, že analyzovanou geometrií je geometrie, která je například již optimalizována na základě zkušenosti projektanta a limitní hodnoty této geometrie se použijí jako vstupní hodnoty vedlejších podmínek pro topologickou optimalizaci stejné, avšak nijak neoptimalizované geometrie. Takovéto využití může být vhodné například ve chvíli, kdy je cílem dostat ještě lépe optimalizovanou geometrii, než jakou navrhl projektant. Strukturální analýza se také obvykle využívá pro analýzu optimalizované geometrie za účelem ověření, že optimalizovaná geometrie splňuje veškeré zadané vedlejší podmínky topologické optimalizace.

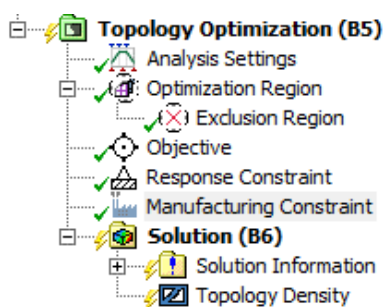
## 3.2 Příprava topologické optimalizace

Modul topologické optimalizace musí být propojen s modulem strukturální analýzy, a to takovým způsobem, který je znázorněn na obrázku 3.3. Alternativní možností je propojení modulu topologické optimalizace s modální analýzou. Modální analýza slouží pro získání informací, jako je například rezonanční frekvence apod. Možností provádění topologické optimalizace s požadavky například na určitou rezonanční frekvenci, kdy se modul topologické optimalizace spojuje právě s modulem modální analýzy, se tato práce nebude zabývat.



Obrázek 3.3 Propojení modulu strukturální analýzy s modulem topologické optimalizace

Propojením modulu strukturální analýzy a modulu topologické optimalizace jsou do modulu topologické optimalizace přenesena data týkající se použitých materiálů, geometrie a také mimo jiné nastavení síťování. Propojením se zároveň v podprogramu „Mechanical“ zobrazí nabídka topologické optimalizace, která bude postupně popsána níže.



Obrázek 3.4 Nabídka modulu topologické optimalizace

## Nastavení Analysis Settings

V nastavení „Analysis Settings“ je možné měnit parametry týkající se samotného procesu provádění topologické optimalizace. Jedním z takovýchto parametrů je maximální počet cyklů. Topologická optimalizace je prováděna iterativně pomocí postupných změn, přičemž parametr maximálního počtu cyklů nám umožňuje zamezit neúměrnému prodlužování provádění topologické optimalizace. Dalším parametrem je přesnost konvergence, což je procentuální odchylka od zadané hodnoty, při které je prohlášeno, že došlo ke konvergenci. Tento parametr může nabývat hodnot od 0 do 2, přičemž pro úlohy, jejichž cílem je minimalizování

objemu/hmotnosti s vedlejší podmínkou danou globálním nebo lokálním ekvivalentním napětím („von Mises Stress“), je vhodné změnit defaultně nastavených 0,1 % na 0,05 %. [15] V nastavení „Analysis Settings“ je dále možné měnit parametr ukládání dat. Ukládání dat je defaultně nastaveno na ukládání výsledků po každé iteraci, dále je možné jej nastavit na ukládání až konečných výsledků, ukládání výsledků pouze poslední iterace, aj. Dále je zde možné zvolit typ řešiče, přičemž na výběr máme tři možnosti, a to buď možnost ponechat nastavení řešiče na softwaru, nebo manuálně nastavit řešič na sekvenční konvexní programování, nebo na kritéria optimality. Řešič na základě sekvenčního konvexního programování by měl ve většině případů dojít ke konvergenci rychleji, avšak je výpočetně náročnější, jelikož pro svou funkci využívá derivace všech funkcí přítomných v úloze topologické optimalizace. Řešič na základě kritérií optimality umožňuje řešit úlohy založené na statické strukturální analýze, a to s omezením cíle na „Compliance“ (viz nastavení „Objective“), omezením vedlejších proměnných na omezení hmotnosti/objemu (viz nastavení „Response Constraint“) a omezením výrobních proměnných pouze na minimální velikost jednotlivých prvků (viz nastavení „Manufacturing Constraint“). [15]

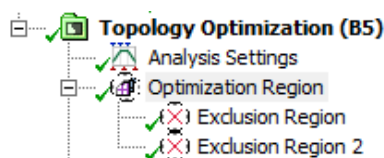
Details of "Analysis Settings" <span>⌵</span>	
[-] Definition	
Maximum Number Of Iterations	500.
Minimum Normalized Density	1.e-003
Convergence Accuracy	5.e-002 %
Penalty Factor (Stiffness)	3.
Region of Manufacturing Constraint	Include Exclusions
Region of Min Member Size	Exclude Exclusions
[-] Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
[+] Output Controls	
[+] Analysis Data Management	

Obrázek 3.5 Nastavení „Analysis Settings“

## Nastavení Optimization Region

Nastavení „Optimization Region“ se dělí na části „Design Region“, „Exclusion Region“ a „Optimization Option“. Část „Design Region“ slouží pro stanovení oblasti, která bude podrobena topologické optimalizaci. Oblasti mohou být nastaveny pomocí výběru geometrie nebo pomocí funkce „Named Selection“, která umožňuje pod jedno pojmenování sdružit více částí, a tyto části jsou následně vybírány pomocí jména. Naproti části „Design Region“ stojí část „Exclusion Region“, která slouží pro definování částí geometrie, které nebudou podrobeny topologické optimalizaci. Defaultně jsou z topologické optimalizace automaticky vyjmuty části sloužící pro kontakt s jinými součástmi nebo předměty a zatížené plochy, k vyjmutí dochází na základě nastavení těchto podmínek ve strukturální analýze. Kromě automatického vyjmutí částí sloužících pro spojení s jinými součástmi a zatížených ploch lze také zvolit možnost automatického vyjmutí pouze zatížených ploch nebo částí sloužících pro spojení s jinými

součástmi. Další možností je manuální selekce částí pro vyjmutí pomocí výběru geometrie nebo pomocí funkce „Named Selection“. Nejčastěji používané je však automatické vyjmutí částí sloužících pro spojení s jinými součástmi a zatížených ploch, jelikož tvar těchto součástí je obvykle daný připojovaným protikusem nebo možnostmi zatížení. V případě, že by možnosti části „Exclusion Region“ vytvořené defaultně v „Optimization Region“ nebyly dostačující, například z důvodu potřeby definování vyjmuté části více způsoby, je možné z horního panelu přidat další možnost „Exclusion Region“, která se vytvoří pod nastavením „Optimization Region“.



Obrázek 3.6 Přidané možnosti „Exclusion Region“

Část „Optimization Option“ slouží pro zvolení, zda výstupem topologické optimalizace má být topologicky optimalizovaný objekt nebo takzvaná mřížková struktura („Lattice Structure“). Mřížková struktura je speciální struktura využívaná ve 3D tisku. Podstata optimalizace jejíž výstupem je vytvoření mřížkové struktury spočívá v zachování vnějších obalových stěn dané geometrie a ve vyplnění vnitřní části dané geometrie mřížkou různého tvaru, přičemž parametry této mřížky musí zajišťovat splnění vedlejších podmínek. Výhodou plynoucí z takovéto optimalizace je snížení množství použitého materiálu a tím pádem i finální ceny výrobku, a to vše ale při zachování námi namodelovaného designu výrobku.

Details of "Optimization Region" <span>⌵</span>	
[-] Design Region	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
[-] Exclusion Region	
Define By	Boundary Condition
Boundary Condition	All Boundary Conditions
[-] Optimization Option	
Optimization Type	Topology Optimization

Obrázek 3.7 Nastavení „Optimization Region“

## Nastavení Manufacturing Constraint

Nastavení „Manufacturing Constraint“, tedy nastavení výrobních omezení, je jediné nastavení topologické optimalizace, které není vytvořeno automaticky, a je tak nutné jej vyvolat, a to buď z horního panelu nebo z nabídky přístupné po kliknutí pravým tlačítkem myši na „Topology Optimization“.

Tato umožňuje omezit výsledek topologické optimalizace tak, aby mohl být optimalizovaný objekt realizovatelný. V případě této práce to například znamená, že musí být daný objekt tisknutelný, takže je vhodné, aby žádná z částí neměla tloušťku menší než 0,5 mm, jelikož je při tisknutí daného výrobku technologií FDM při použití trysky s průměrem 0,4 mm přesnost tisku právě maximálně 0,5 mm. Naopak při výrobě optimalizovaného objektu například vstřikováním je nutné omezit výsledek topologické optimalizace tak, aby bylo možné výrobek z formy vyndat, nabízí se tak omezení na směr tažení.

Nastavení „Manufacturing Constraint“ nabízí možnost omezení velikosti jednotlivých prvků „Member Size“, směru vytahování „Pull Out Direction“, omezení pro výrobu tažením „Extrusion“, cyklování (opakování) „Cyclic“ nebo omezení na symetrii podle určité osy „Symetric“.

## **Nastavení Response Constraint**

Pomocí nastavení „Response Constraint“ je možné nastavovat různé druhy vedlejších podmínek a zároveň je také možné je různé kombinovat. Mezi vedlejší podmínky v tomto případě patří omezení hmotnosti/objemu, omezení globálního nebo lokálního ekvivalentního napětí („von Mises Stress“), omezení posunu, případně odolnost vůči působení síly.

V případě vedlejší podmínky omezení hmotnosti nebo vedlejší podmínky omezení objemu je možné zadat buď přesné procento původního objemu/váhy neoptimalizovaného objektu, které se má zachovat, nebo procentuální rozmezí vyjadřující, kolik procent z původního objemu/váhy neoptimalizovaného objektu se má maximálně zachovat a kolik minimálně.

V případě vedlejší podmínky globálního ekvivalentního napětí se nastavuje pouze hodnota ekvivalentního napětí v MPa. U vedlejší podmínky lokálního ekvivalentního napětí se kromě hodnoty nastavuje také místo, na které je tato podmínka aplikována, přičemž je zde také možnost nastavení určitého konečného prvku, hrany, plochy nebo těla. Zároveň je také možné kombinovat vícero vedlejších podmínek lokálního ekvivalentního napětí pro různá místa.

V případě vedlejší podmínky omezení posunu lze opět stanovit omezení posunu určitého konečného prvku, hrany, plochy nebo těla, a to v každé ose zvlášť. V případě, že posun v některé z os necháme nevyplněný, pak není posun v této ose nijak limitován.

Details of "Response Constraint"	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
[-] Definition	
Type	Response Constraint
Response	Displacement
Coordinate System	Nodal Coordinate System
X Component (Max)	Free
<input type="checkbox"/> Y Component (Max)	2.9901e-002 mm
Z Component (Max)	Free
Environment Selection	All Static Structural
Suppressed	No

Obrázek 3.8 Nastavení vedlejší podmínka omezení posunu

V případě vedlejší podmínky odolnosti vůči působení reakčních sil se zadává velikost síly, kterou zadaný node (spojnice několika bodů) musí vždy podepřít. [15]

## Nastavení Objective

V nastavení „Objective“ dochází k definování cíle topologické optimalizace. Je zde na výběr ze tří možností. Prvním cílem je minimalizování objemu a druhým cílem je minimalizování váhy. Třetím cílem je možnost „Compliance“, jejímž minimalizováním dochází k maximalizování strukturální pevnosti definované buď posunem, nebo velikostí reakční síly, přičemž je vhodné zvolit pouze jeden způsob, jelikož přidružená strukturální analýza nedokáže pracovat zároveň s oběma způsoby. [15]

Jak je vidět na obrázku 3.9 níže, v případě požadavku na více cílů například „Compliance“ a minimalizování váhy je možné přidat řádek a zadat oba cíle. Zároveň je také možné jednotlivým cílům přiřadit různou váhu.

Je nutné poznamenat, že v případě stanovení cíle minimalizování váhy už není možné využít vedlejší podmínku omezení hmotnosti.

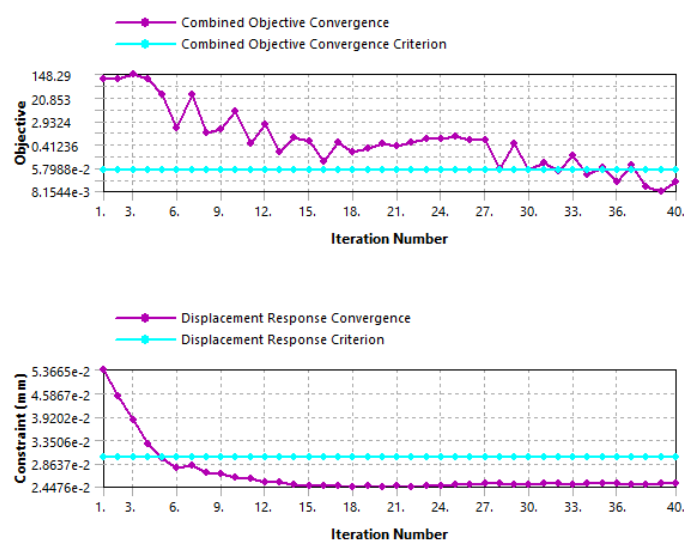
Objective												
Right click on the grid to add, modify and delete a row.												
Enabled	Response Type	Goal	Formulation	Environment Name	Weight	Multiple Sets	Start Step	End Step	Step	Start Mode	End Mode	Mode
<input checked="" type="checkbox"/>	Compliance	Minimize	Displacement	Static Structural	1	Enabled	1	1	1	N/A	N/A	N/A
<input checked="" type="checkbox"/>	Mass	Minimize	N/A	N/A	1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Obrázek 3.9 Nastavení „Objective“

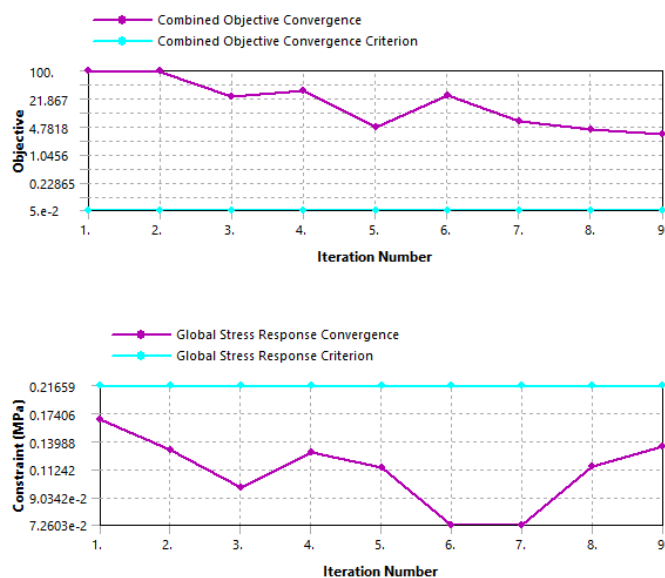


### 3.3 Vyhodnocení výsledků topologické optimalizace

Jakmile jsou provedena veškerá nastavení zmíněná v předchozí podkapitole, je možné přistoupit k provedení samotné topologické optimalizace. Po spuštění topologické optimalizace je možné tento proces přerušit. Při přerušení je možné zjistit stav konvergence, a to prostřednictvím konvergenčních grafů. Konvergenční graf je možné zobrazit v položce „Solution Information“ a možnosti „Solution Output“. V možnosti „Solution Output“ je možné zvolit z různých možností, přičemž podle zadaného cíle a vedlejších proměnných je možné zvolit nejčastěji „Objective & Displacement Response Convergence“ pro vedlejší podmínky posunu, nebo také „Objective & Mass Response Convergence“, případně „Objective & Volume Response Convergence“.



Obrázek 3.10 Příklad konvergenčního grafu konvergované topologické optimalizace



Obrázek 3.11 Příklad konvergenčního grafu nekonvergované topologické optimalizace

Konvergenční grafy se skládají ze dvou grafů. Na prvním grafu je vidět konvergence kombinace cílů. Na druhém, přehlednějším, grafu je pak viditelná hodnota dané vedlejší podmínky a hodnota, kterou dosáhl alespoň částečně topologicky optimalizovaný model, například na obrázku výše se jedná o hodnotu maximálního posuvu ve směru osy Z. Z druhého grafu je tedy patrné, jak blízko se zadaným vedlejšími podmínkám proces topologické optimalizace přiblížil, na základě čehož je možné se rozhodnout, zda lze takovéto řešení již považovat za uspokojivé.

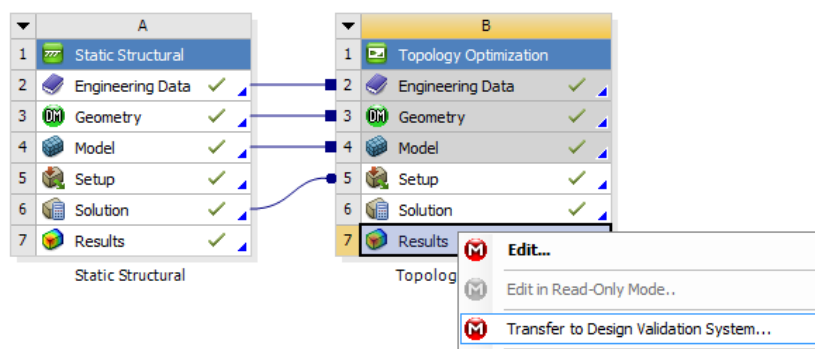
Výsledek získaný topologickou optimalizací je možné zobrazit v položce zvané „Topology Density“, po otevření této položky dojde k zobrazení výsledku topologické optimalizace. Takto optimalizovaný objekt má defaultně odstraněny ty konečné prvky, které jsou vyhodnoceny jako zbytečné, a ponechány ty, které jsou označeny jako nezbytné, dále však obsahuje také takové konečné prvky, které se nacházejí na pomezí mezi zbytečnými a nezbytnými. U těchto konečných prvků se může uživatel rozhodnout, zda je chce ponechat a zároveň jakou část z nich chce ponechat, přičemž toto nastavení je umožněno prostřednictvím táhla možnosti „Retained Treshold“. Toto táhlo umožňuje nastavit hodnoty od 0.01 po 0.99, přičemž defaultně je nastavena hodnota 0.5. Čím vyšší hodnota, tím více konečných prvků se zachová a naopak. V této položce je také možné pozorovat různé statistické hodnoty, například původní objem a obsah, a objem a obsah po provedení topologické optimalizace a zároveň také tytéž hodnoty vyjádřené procentuálně nebo počet proběhlých iterací, než došlo ke konvergenci.

Details of "Topology Density"	
Definition	
Type	Topology Density
By	Iteration
Iteration	Last
<input type="checkbox"/> Retained Threshold	0.5
Exclusions Participation	Yes
Calculate Time History	Yes
Suppressed	No
Results	
<input type="checkbox"/> Minimum	1.e-003
<input type="checkbox"/> Maximum	1.
<input type="checkbox"/> Average	0.79842
<input type="checkbox"/> Original Volume	4.1736e+006 mm <sup>3</sup>
<input type="checkbox"/> Final Volume	3.9433e+006 mm <sup>3</sup>
<input type="checkbox"/> Percent Volume of Original	94.484
<input type="checkbox"/> Original Mass	5.1752 kg
<input type="checkbox"/> Final Mass	4.8897 kg
<input type="checkbox"/> Percent Mass of Original	94.484
Visibility	
Show Optimized Region	Retained Region
Information	
Iteration Number	40

Obrázek 3.12 Položka „Topology Density“

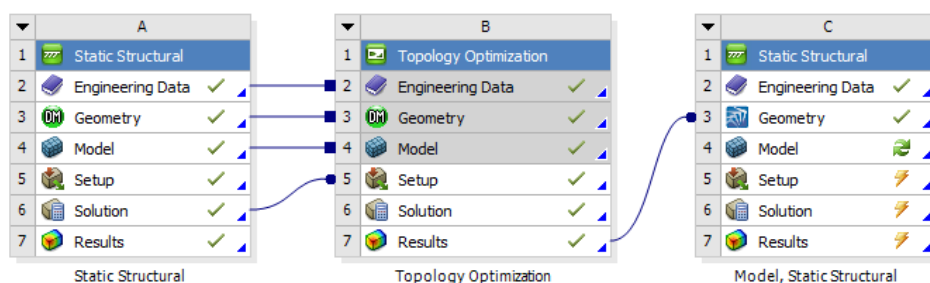
Jakmile je výsledek topologické optimalizace uspokojující, lze přistoupit k validaci daného výsledku topologické optimalizace, přičemž jako vstup se použije výsledek topologické optimalizace s nastavenou hodnotou „Retained Treshold“. Validace může probíhat minimálně třemi způsoby, a to za prvé prostřednictvím prostředků softwaru Ansys, za druhé pomocí

prostředků jiných softwarů, nebo za třetí přibližným překreslením výsledků topologické optimalizace do nového modelu. Při zvolení prvního nebo třetího způsobu z uvedených způsobů se výsledek topologické optimalizace nejprve převede do nového modulu strukturální analýzy, a to tak, že se pravým tlačítkem myši klikne na položku „Results“ modulu topologické optimalizace a vybere možnost „Transfer to Design Validation System“.



Obrázek 3.13 Převedení výsledku topologické optimalizace

Vybráním této možnosti dojde k vytvoření nového modulu strukturální analýzy, kde vstupem do položky „Geometry“ bude právě výsledek topologické optimalizace.



Obrázek 3.14 Pospojování jednotlivých modulů pro validaci výsledku topologické optimalizace

Geometrii následně otevřeme v podprogramu „SpaceClaim“. V případě validace pomocí jiných softwarů lze tuto geometrii z podprogramu „SpaceClaim“ uložit například ve formátu parasolid a následně ji otevřít například v programu SolidWorks. Třetí způsob validace se využívá, pokud chceme dostat model s jasnými hranami a plochami, což může být výhodné například v případě, že se jedná o relativně malý model, u něhož by bylo vytváření různých biologických struktur velmi náročné, případně nemožné. Biologickými strukturami jsou myšleny takové struktury, které svým tvarem připomínají struktury vytvořené živými organismy, jak je vidět například na obrázku níže.



*Obrázek 3.15 Biologická struktura části skateboardu [16]*

Při překreslování je možné s výhodou využít nástroje podprogramu „SpaceClaim“ pro měření. Překreslený model následně vložíme do nového modulu strukturální analýzy a při zadání stejných vnějších podmínek zjistíme, zda tento překreslený model splňuje žádané vedlejší podmínky.

První způsob validace za pomoci prostředků softwaru Ansys je vhodné používat pouze v případě, že optimalizovaný objekt neobsahuje části, které jsou vůči celkovým rozměrům relativně malé tak, jak je to vidět například na obrázku níže na invertovaném modelu topologicky optimalizované části konstrukce. Zmiňovanými částmi, kvůli kterým není vhodné tento objekt validovat za pomoci prostředků softwaru Ansys, jsou v tomto případě otvory ve vrchní části modelu. Dále není vhodné tento způsob validace používat v případě, že byly topologickou optimalizací částečně optimalizovány i kontaktní části.



*Obrázek 3.16 Invertovaná topologicky optimalizovaná část mostní konstrukce*

Důvodem pro výše uvedené je to, že model je rozdělen na velké množství konečných prvků, které jsou různě orientovány, a povrch tak není hladký a je nutné použít například nástroj „Shrinkwrap“, který povrch vyhladí, čímž však může dojít i k vyhlazení malých objektů. Co se týká druhého případu tak, jak již bylo řečeno, model je rozdělen na velké množství konečných prvků, což komplikuje kontaktování těchto ploch s protikusovými plochami, a je tedy nutné

využít invertovaného topologického modelu, jako je to například vidět na obrázku výše, který z původního neoptimalizovaného modelu pomocí nástroje „Combine“ odstraní části, které byly optimalizací vyhodnoceny jako nepotřebné. Pokud by však topologická optimalizace zasahovala i do kontaktních částí, tak by nebylo možné toto kombinování provést. Pokud topologicky optimalizovaný model nespadá do výše uvedených případů, kdy není vhodné tento způsob validace používat, postupuje se při validaci tímto způsobem následovně. V podprogramu „Mechanical“ v položce „Topology Density“ je nutné přepnout možnost „Show Optimized Region“ na „Removed Region“, díky čemuž dojde k invertování výsledku topologické analýzy a je zobrazena oblast, která byla odebrána, a tato oblast bude použita jako vstup do následné strukturální analýzy. Následně převedeme pomocí možnosti „Transfer to Design Validation System“ invertovaný topologicky optimalizovaný model do modulu strukturální analýzy a otevřeme jej v podprogramu „SpaceClaim“. V podprogramu „SpaceClaim“ se invertovaný topologicky optimalizovaný model zobrazí v seznamu modelů jako část pojmenovaná „Facets“. Než bude možné přistoupit k samotné strukturální analýze, je nutné model upravit, a to například pomocí nástroje „Shrinkwrap“, popsáného výše, nacházejícího se v záložce „Facets“. Dále musí být upravený model převeden na tzv. solid model, což je možné kliknutím pravým tlačítkem myši na daný model v seznamu modelů a zvolením možnosti „Convert to Solid“ a „Do not merge faces“. Takto převedený model musíme následně zkombinovat s původním modelem pomocí nástroje „Combine“ nacházejícím se v záložce „Design“. Kombinováním dojde k identifikaci překrývajících se částí, přičemž z původního objektu bude tato část „vyříznuta“. Tento objekt je již možné použít pro strukturální analýzu, kde opět, stejně jako ve třetím způsobu, při zadání stejných vnějších podmínek zjistíme, zda tento překreslený model splňuje žádané vedlejší podmínky.

## **4 TOPOLOGICKÁ OPTIMALIZACE V SOFTWARE SOLIDWORKS**

V této kapitole bude popsána topologická optimalizace v softwaru SolidWorks, stejně jako v předcházející kapitole bude tedy kladen důraz především na modul topologické optimalizace. Zároveň bude také v této kapitole zmíněn i modul strukturální analýzy, který není nutné v softwaru SolidWorks propojovat s modulem topologické optimalizace, ale je možné jej využít jako samostatný modul například pro ověření výsledků topologické optimalizace.

SolidWorks je 3D CAD software společnosti Dassault Systèmes. První verze tohoto softwaru vznikla v roce 1995 a od té doby vzniklo již dalších 26 verzí. Při navrhování systému bylo cílem představení 3D modelovacího softwaru, který by byl uživatelsky přívětivý, cenově dostupný a zároveň také spustitelný na operačním systému Windows. [17] V roce 2018 pak byl do programu SolidWorks přidán modul topologické optimalizace. Tento modul je dostupný pro licence Simulation Professional a Simulation Premium.

### **4.1 Strukturální analýza**

Jak již bylo zmíněno výše, v programu SolidWorks nedochází k žádnému propojení samostatného modulu strukturální analýzy s modulem topologické optimalizace. Z tohoto důvodu obsahuje modul topologické optimalizace veškerá nastavení, která obsahuje také modul strukturální analýzy. Jediným rozdílem mezi těmito dvěma moduly je absence nastavení cílů a výrobních omezení v modulu strukturální analýzy, a proto bude veškeré nastavení popsáno na modulu topologické analýzy.

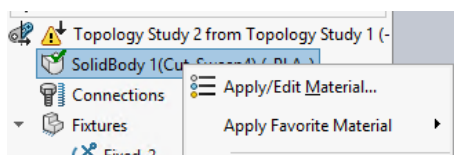
### **4.2 Příprava topologické optimalizace**

Značným omezením topologické optimalizace v softwaru SolidWorks je limitace na provádění topologické optimalizace pouze jediné části. Není tedy možné provádět topologickou optimalizaci například na jednom dílu sestavy s využitím zbytku sestavy pro definování působících sil, tedy například topologickou optimalizaci části mostní konstrukce, kdy zbytek mostní konstrukce je využit pro definování působících podmínek na danou část konstrukce. Z toho vyplývá, že je pro správnou funkčnost topologické optimalizace v softwaru SolidWorks nezbytně nutné přesně znát vnější podmínky působící na daný model a speciálně na jeho kontakty, což může být v některých případech velmi limitující.

Modul topologické optimalizace v softwaru SolidWorks se spustí tak, že se z horní lišty vybere záložka Simulace a možnost „New Study“. Následně se zobrazí volič všech simulací, které jsou pro danou licenci dostupné, a z těchto možností zvolíme možnost „Topology Study“, čímž dojde ke spuštění modulu topologické optimalizace.

## Přiřazení materiálu

V tomto nastavení dochází k přiřazování materiálu modelu. Toto nastavení odpovídá sekci modulu v softwaru Ansys zvané „Engineering Data“ a stejně jako v softwaru Ansys umožňuje vybrat žádaný materiál z velkého množství předdefinovaných materiálů, případně vytvořit vlastní. Stejně jako v softwaru Ansys, i zde platí, že pokud nastavujeme vlastní materiál, musíme pro správnou funkčnost nastavit alespoň hustotu, Poissonovo číslo a Youngův modul pružnosti v tahu, případně modul pružnosti ve smyku. Určité zjednodušení při definování vlastního materiálu, oproti definování materiálu v softwaru Ansys, představuje navádění, které pomocí barevného odlišení – červené barvy – určitých parametrů znázorňuje, které parametry je nezbytně nutné zadat.



Obrázek 4.1 Přiřazení materiálu

Material properties  
Materials in the default library can not be edited. You must first copy the material to a custom library to edit it.

Model Type:

Units:

Category:

Name:

Default failure criterion:

Description:

Source:

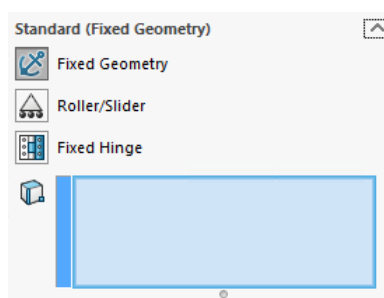
Sustainability:

Property	Value	Units
Elastic Modulus	2000	N/mm <sup>2</sup>
Poisson's Ratio	0.394	N/A
Shear Modulus	318.9	N/mm <sup>2</sup>
Mass Density	1020	kg/m <sup>3</sup>
Tensile Strength	30	N/mm <sup>2</sup>
Compressive Strength		N/mm <sup>2</sup>
Yield Strength		N/mm <sup>2</sup>
Thermal Expansion Coefficient		/K

Obrázek 4.2 Definování vlastního materiálu

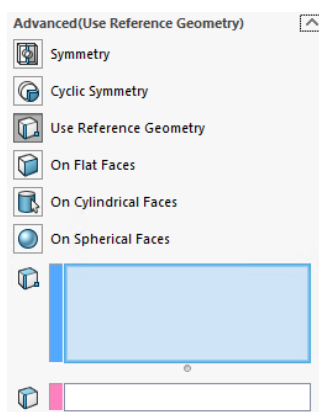
## Nastavení Fixtures

V nastavení „Fixtures“ je možné definovat různé druhy spojení. Pro správnou funkčnost topologické optimalizace je nutné definovat spojení alespoň v jednom místě. V případě, že bychom nedefinovali žádné spojení, nebylo by možné určit, jak se model bude chovat při působení různých druhů zátěže. Nejobvyklejším typem spojení je pevné spojení, které neumožní žádný pohyb plochy, na kterou působí. Dalším možným typem spojení je například spojení typu „Slider“, které umožňuje vykonávat pouze translační pohyb v rovině dané plochou, na kterou působí. Poslední ze standardních typů spojení je tzv. „Fixed Hinge“ spojení, které naopak neumožňuje translační pohyb, ale pouze rotační pohyb, a to okolo rotační části daného modelu.



Obrázek 4.3 Nastavení „Fixture“ - standardní spojení

V tomto nastavení je dále ve skupině „Advanced“ možné nastavit další užitečné parametry, jako je například symetrie nebo cyklická symetrie. Tyto parametry umožňují zjednodušení výpočtu, jelikož není nutné provádět výpočty pro tak velké množství konečných prvků. Cyklická symetrie umožňuje zjednodušení pro rotační tělesa, například pro disky kol.

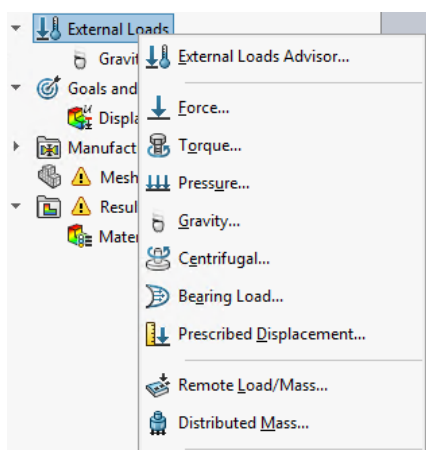


Obrázek 4.4 Nastavení „Fixture“ – „Advanced“



## Nastavení External Loads

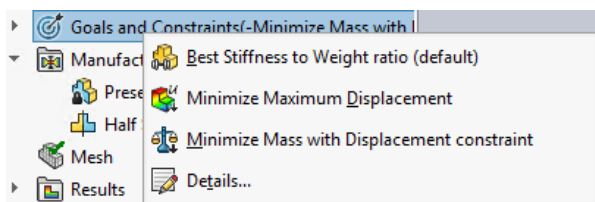
V nastavení „External Loads“ je možné definovat různé druhy vnějších podmínek působících na daný model. Typicky se využívá směr působení gravitace a další zatížení na určitou plochu. Například u síly nebo tlaku působícího na určitou plochu je zároveň také možné definovat, zda bude tato síla působit rovnoměrně kolmo na danou plochu nebo například ve směru určité plochy, což je výhodné například u zakřivených ploch, na které chceme z určitých důvodů působit v určitém směru. Tuto variantu zvolíme přepnutím typu působení na „Selected Direction“.



Obrázek 4.5 Možnosti externích zatížení

## Nastavení Goals and Constraints

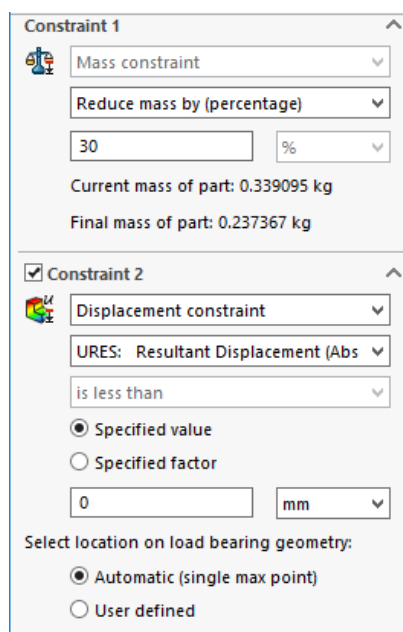
Další odlišností od modulu topologické optimalizace v softwaru Ansys je možnost definování pouze jediného cíle. Na výběr máme tři druhy cílů, a to co nejlepší poměr tuhosti k váze objektu, minimalizování maximálního posunutí a minimalizování váhy s limitem posunutí.



Obrázek 4.6 Možnosti cílů topologické optimalizace

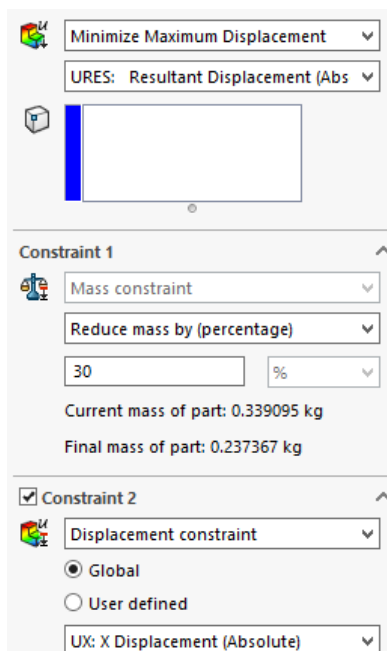
V případě prvního druhu cíle je tuhost definována jako suma deformačních energií všech konečných elementů, přičemž cílem je v tomto případě co nejvíce tuto sumu snížit. [18] Jak je vidět na obrázku níže, tento cíl je také možné omezit dvěma druhy vedlejších podmínek. Prvním

druhem vedlejších podmínek je podmínka množství odebrané váhy, přičemž tato podmínka je trvalá a nelze ji vypnout. Druhou, v tomto případě volitelnou, podmínkou je vedlejší podmínka posunu, která umožňuje definovat maximální posun buď v jedné ose, nebo ve všech osách. Zároveň je také možné zvolit, zda se automaticky nebo manuálně vybere bod s největším posunem a na něj se aplikuje tato podmínka. Automatický výběr je výhodný zejména v případě složitější geometrie, neboť uživatel nemusí odhadovat, kde dochází k největšímu posuvu. Při manuálním výběru může uživatel sám zvolit místo, na které se aplikuje podmínka maximálního posuvu, což může být výhodné, například pokud je daný objekt součástí sestavy, která umožňuje pouze určitý maximální posuv dané součásti tak, aby nedošlo například ke kontaktu s jinou součástí této sestavy.



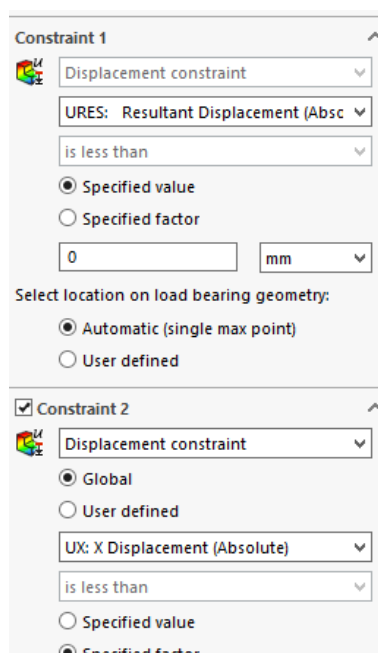
Obrázek 4.7 Možnosti podmínek cíle „Best Stiffness to Weight Ratio“

V případě druhého druhu cíle je naopak volen takový design objektu, který minimalizuje posun určitého definovaného bodu a zároveň však má co nejlepší poměr tuhosti k váze objektu. [18] Stejně jako v případě předchozího cíle je zde možné definovat dva druhy vedlejších podmínek, a to vedlejší podmínku množství odebrané váhy, která je opět pevně daná, a volitelnou vedlejší podmínku maximálního posuvu. Využití volitelné vedlejší podmínky maximálního posuvu v kombinaci s tímto druhem cíle může být výhodné například v případě, že chceme docílit takové optimalizace designu, kdy dochází k minimálnímu posuvu určitého bodu a zároveň dochází k menšímu než maximálnímu posuvu například určité vzdálené části nebo i samotného bodu, u kterého je daným cílem minimalizován posuv. V případě omezení maximálního posuvu bodu, u kterého je daným cílem minimalizován posuv, je však nutné volit hranici maximálního posuvu s velkou obezřetností, jelikož nevhodně zvolená podmínka může snadno vést k nemožnosti konvergence topologické optimalizace.



Obrázek 4.8 Možnosti vedlejších podmínek cíle „Minimize Maximum Displacement“

V případě třetího cíle je volen design objektu tak, aby byla váha objektu co nejvíce minimalizována a zároveň nedošlo k porušení první vedlejší podmínky maximálního posuvu. [18] Na rozdíl od minulých cílů je zde možné definovat pouze jeden druh vedlejších podmínek, a to vedlejší podmínky na maximální posuv, přičemž jak již bylo řečeno výše, první z těchto podmínek je povinná. Druhá vedlejší podmínka maximálního posuvu je volitelná, přičemž její možné využití je obdobné s možným využitím popsaným v předcházejícím odstavci u druhého cíle.

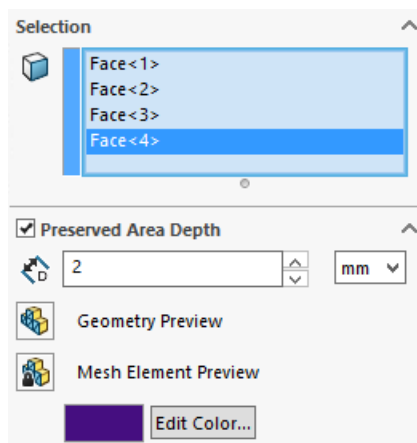


Obrázek 4.9 Možnosti vedlejších podmínek cíle „Minimize Mass with Displacement Constraint“

Kromě vedlejších podmínek zadaných v rámci cílů je také možné přes možnost „Goals and Constraints“ na horní nabídkové liště přidat další vedlejší podmínky, a to konkrétně vedlejší podmínky posuvu a vedlejší podmínku množství odebrané váhy. Na rozdíl od modulu topologické optimalizace v softwaru Ansys zde však není možné nastavit vedlejší podmínky například globálního ekvivalentního napětí apod.

## Nastavení Manufacturing Constraints

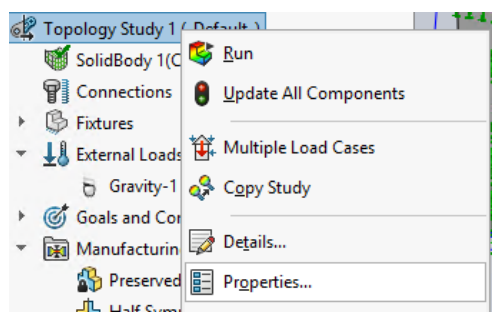
V nastavení „Manufacturing Constraints“ je možné nastavit čtyři různé druhy výrobních omezení. Mezi výrobní omezení, která jsou nastavitelná v programu SolidWorks, patří nastavení zachovávaných ploch, směr vytažení z formy, symetrie a minimální tloušťka. Nastavení zachovávaných ploch je obdobné jako nastavení „Exclusion Region“ z topologické optimalizace v softwaru Ansys, které se však v softwaru Ansys nachází v nastavení „Optimization Region“. Rozdílem oproti „Exclusion Region“ je fakt, že plochy, na které je vyvíjen tlak, nebo jsou součástí uchycení, jsou zachovávány automaticky a toto nastavení je možné změnit pouze v nastavení samotné topologické optimalizace. Užitečnou funkcí, kterou lze využít při zadávání zachovávaných ploch, je funkce nastavení hloubky zachovávané plochy. Při zvolení nenulové hodnoty tedy dojde k manuálnímu zachování nejen samotné plochy, ale také určitého objemu pod touto plochou.



Obrázek 4.10 Výrobní omezení zachovávané plochy

## Nastavení vlastností topologické optimalizace

Nastavení vlastností topologické optimalizace je možné otevřít stisknutím pravého tlačítka myši na možnosti „Topology Study“ a vybráním možnosti „Properties“.

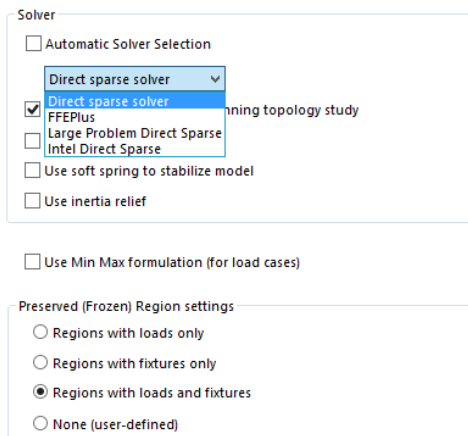


Obrázek 4.11 Nastavení vlastností topologické optimalizace

V nastavení topologické optimalizace v záložce „Options“ můžeme mimo jiné nastavovat řešič, přičemž na výběr máme možnosti automatického nastavení, nebo manuálního nastavení. Software SolidWorks nabízí pro topologickou optimalizaci čtyři řešiče, a to buď přímé řešiče „Direct Sparse Solver“, „Large Problem Direct Sparse“, nebo „Intel Direct Sparse“, nebo iterativní řešič FFEPlus.

„Direct sparse solver“ je vhodné využívat, pokud máme k dispozici velký výpočetní výkon, co se týká jak paměti RAM, tak procesoru, dále se tento využívá v případě, že je zakázána penetrace mezi jednotlivými objekty a jednotlivé objekty jsou z velmi odlišných materiálů. Co se týká prostoru nárokováného tímto řešičem, lze říci, že na 200 000 stupňů volnosti spotřebuje řešič 1 GB paměti RAM. [19] V současné době však není možné nijak přímo zjistit počet stupňů volnosti [20] a lze ho tedy pouze odhadovat např. z počtu nodů (vrcholů), přičemž jak je z různých článků patrné, lze přibližně počítat, že na každý nod připadají tři stupně volnosti [21]. Řešič FFEPlus je vhodné naopak používat v případě, že máme menší množství dostupné paměti RAM, jelikož tento řešič využívá pokročilou techniku uspořádání matic, čímž zvyšuje účinnost pro velké problémy a lze počítat 1 GB paměti RAM na dva miliony stupňů volnosti. V případě, že řešený problém je velký, lze využít řešič „Large Problem Direct Sparse“, který dokáže díky upraveným algoritmům lépe pracovat s více jádry procesoru a s pamětí překračující možnosti paměti RAM. Algoritmy řešiče „Intel Direct Sparse“ jsou upraveny tak, že u simulací prováděných přímo v procesoru dokáží lépe alokovat paměť a lépe využívat schopnosti vícejádrového zpracování. Lze tedy říct, že pro většinu případů je nejefektivnějším řešičem „Intel Direct Sparse“, v případě, že se jedná o velké problémy, je naopak nejefektivnějším řešičem řešič „Large Problem Direct Sparse“. [19]

Jak již bylo zmiňováno výše, v záložce „Options“ je také možné upravit nastavení automaticky zachovávaných ploch. V defaultním nastavení jsou zachovávány plochy, na které je vyvíjen tlak, a plochy, které slouží k uchycení. Defaultní nastavení je však možné změnit na zachovávání pouze ploch, na které je vyvíjen tlak, nebo naopak zachování pouze ploch, které slouží k uchycení, případně je možné automatické zachovávání určitých ploch úplně vypnout a nastavovat zachovávané plochy manuálně.

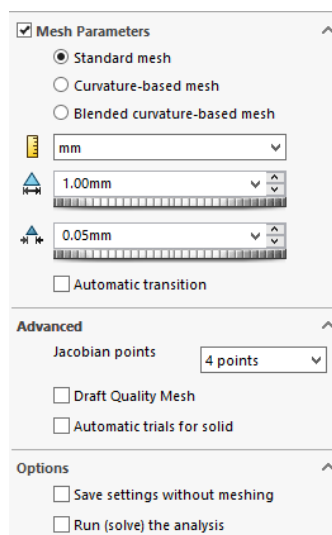


Obrázek 4.12 Nastavení vlastností topologické optimalizace – záložka „Options“

Nastavení vlastností topologické optimalizace umožňuje dále v záložce „Advanced“ nastavit počet iterací, po jejichž uplynutí dojde k automatickému zastavení topologické optimalizace. Na rozdíl od topologické optimalizace v softwaru Ansys je zde však možné nastavit maximálně 100 iterací, přičemž defaultní hodnota v Ansysu je 500. Nastavení topologické optimalizace v záložce „Notifications“ dále obsahuje užitečnou funkci zaslání emailu při dokončení topologické optimalizace nebo po uplynutí určitého časového intervalu.

## Nastavení Mesh

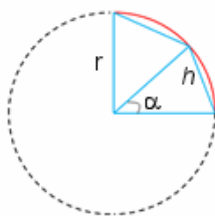
Software SolidWorks nabízí tři druhy sítí, a to standardní síť, zakřivenou síť („Curvature-based Mesh“) a smíšenou zakřivenou síť („Blended Curvature-based Mesh“). Mezi těmito sítěmi je možné volit po otevření nastavení „Mesh“ a části „Mesh Parameters“ tak, jak je to vidět na obrázku níže.



Obrázek 4.13 Nastavení „Mesh“

Při využití standardní sítě je nutné zadat dva parametry, kterými jsou velikost jednotlivých prvků a tolerance velikosti. Zároveň je také možné zadat volitelný parametr „Automatic Transition“. Proces síťování pomocí standardní sítě síťuje nejprve plochy, a to pomocí ideálních – rovnoramenných trojúhelníků, přičemž takovéto trojúhelníky mají sledovaný parametr poměru stran („Aspect Ratio“) rovný jedné. Čím větších hodnot nabývá tento parametr, tím horší je kvalita sítě, jelikož dochází, stejně jako v softwaru Ansys, ke zkreslení výsledků, a proto je vhodné tento poměr stran udržet co nejnižší. Jakmile jsou plochy objektu vyplněny, dochází k vyplnění objemu tetrahedrony, přičemž v této fázi dochází k lepšímu využití více jader procesoru a tím pádem i ke zkrácení času potřebného pro zasíťování objektu. [22] Při aktivaci volitelného parametru „Automatic Transition“ provede síťovací proces automaticky zjemnění sítě u otvorů nebo ostrých zakřivení tak, aby byly i tyto části objektu kvalitně zasíťovány. [23] Pro udržení co nejnižší hodnoty poměru stran je vhodné tento druh sítě využívat pro relativně jednoduché objekty.

Při využití zakřivené sítě je nutné zadat parametry minimální a maximální délky  $h$  daných prvků, minimální počet prvků, které vyplní kruh a růstový poměr prvků („Element Growth Ratio“). Tuto síť je vhodné používat pro složitější objekty, a především pro ty, které obsahují různá zakřivení, jelikož takovéto objekty dokáže zasíťovat lépe než standardní síť. Velikost konečných elementů spočívá v tomto případě na zadaném množství prvků, které vyplní kruh, kdy jak je vidět na obrázku níže, v případě, že je minimální počet prvků, které vyplní kruh, roven například osmi, pak čtvrtina kruhu je vyplněna minimálně dvěma prvky, přičemž délka  $h$  se zároveň rovná přibližně násobku poloměru kruhu a úhlu  $\alpha$ . Minimální a maximální hodnoty délky  $h$  je tedy vhodné volit rozumně s ohledem na zakřivenost různých ploch objektů. Parametr růstového poměru prvků udává, s jakým poměrem se mohou zvětšovat směrem od nejvíce zakřivených ploch. [23] Síťováním objektu tímto druhem sítě je také obvykle dosaženo kratšího času potřebného k zasíťování, jelikož tento proces dokáže lépe využívat více jader procesoru nejen v případě síťování objemu, jako je tomu u standardní sítě, ale také při síťování ploch. [22]



Obrázek 4.14 Schématické znázornění konečných prvků zakřivené sítě [23]

Při využití smíšené zakřivené sítě je nutné zadávat stejné parametry, jako je tomu v případě zakřivené sítě. Rozdíl mezi smíšenou zakřivenou sítí oproti zakřivené síti spočívá v tom, že v případě zakřivené sítě jsou výše popsáním způsobem síťovány pouze plochy a při vytváření sítě uvnitř objemu dojde k přepnutí zpět na standardní síť. V případě, že objekt

obsahuje drobné detaily, tak může dojít ke vzniku nekvalitní sítě, či dokonce k selhání síťování. Tomuto by měla zabránit smíšená zakřivená síť, která má upravené algoritmy přepínání na standardní síť, a dokáže tak zasíťovat objekty s drobnými detaily lépe než předchozí druhy sítí, a dosáhnout tak lepších hodnot poměrů stran. Zásadní nevýhodou takovéto sítě je však její rychlost, neboť tento proces síťování nedokáže využívat výhod více jádrových procesorů. [24]

U kteréhokoliv druhu sítě také můžeme určit, že se má jednat o návrhovou kvalitu. Defaultně je nastavena kvalitní síť. Toto nastavení lze však upravit v položce „Advanced“. Rozdílem je, že v případě návrhové kvality mají tetrahedrony tvořící konečné prvky čtyři nody, a tedy i méně stupňů volnosti. Naopak v případě kvalitní sítě je síť tvořena tetrahedrony s 10 nody – čtyři ve vrcholech a dalších šest v prostředku každé strany, přičemž s vyšším počtem nodů se pojí i větší množství stupňů volnosti. [21] Využití kvalitní sítě má za následek dosažení přesnějších výsledků, což je, stejně jako v případě softwaru Ansys, klíčové.

V položce „Advanced“ je dále možné nastavit počet Gaussových bodů (možnost „Jacobian Points“). Tyto body slouží pro měření zkreslení konečných prvků. V případě, že se středy jednotlivých stran nacházejí na rovné úsečce mezi vrcholovými nody, je Jakobiho poměr roven jedné, a čím více jsou hrany zakulacené, tím se toto číslo zvyšuje. Hraniční hodnota, kterou by Jakobiho poměr neměl překročit, aby mohl být považován za akceptovatelný, je 40, přičemž SolidWorks automaticky upravuje polohu středů stran tak, aby byl výsledný Jakobiho poměr nižší, než je zmíněná hraniční hodnota. [25] Po vytvoření sítě lze hodnoty Jakobiho poměru zobrazit v grafu, a to tak, že pravým tlačítkem myši klikneme na možnost „Mesh“ a z nabídky vybereme možnost „Create Mesh Quality Plot“ a vybereme možnost „Jacobian“.

Pokud chceme zjistit, zda je síť dostatečně kvalitní, využijeme k tomu především hodnot poměrů stran, které by se v maximu měly pohybovat pod hodnotou 30 pro složité modely a 10 pro jednodušší modely. Dále by také měly mít složité modely alespoň 90 % a jednodušší modely alespoň 99 % konečných prvků pod hodnotou poměru stran rovné třem. Zároveň by také procentuální poměr počtu prvků s vyšší hodnotou poměru stran než 10 měl být co nejnižší, ideálně roven nule. [26] Maximální hodnotu poměrů stran lze zjistit dvěma způsoby. Prvním způsobem je zobrazení grafu, což probíhá totožně jako v případě vytváření Jakobiho grafu, s tím rozdílem, že se vybere možnost „Aspect ratio“ namísto „Jacobian“. Druhým způsobem je zobrazení detailních informací, kde je zároveň možné zjistit i další sledované parametry. Toto zobrazení je přístupné po stisknutí pravého tlačítka myši na možnosti „Mesh“ a vybrání možnosti „Details“ z nabídky.



Mesh Details	
Study name	Topology Study 1 (-Default-)
Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used	Curvature-based mesh
Jacobian points	4 points
Max Element Size	1.5 mm
Min Element Size	0.5 mm
Mesh quality	High
Total nodes	650580
Total elements	463048
Maximum Aspect Ratio	6.5898
Percentage of elements with Aspect Ratio < 3	100
Percentage of elements with Aspect Ratio > 10	0
% of distorted elements (Jacobian)	0
Time to complete mesh(hh:mm:ss)	00:00:37
Computer name	ETE-ANSYS

Obrázek 4.15 Detailní informace o síti

### 4.3 Vyhodnocení výsledků topologické optimalizace

V případě, že jsme nastavili veškeré žádané parametry topologické optimalizace, je možné ji spustit, což se provede stisknutím pravého tlačítka myši na možnosti „Topology Study“ a vybráním možnosti „Run“. Po dokončení topologické optimalizace je možné si její výsledky zobrazit v grafu „Material Mass“ nacházejícím se v položce „Results“. Vyhodnocení topologické optimalizace v programu SolidWorks nabízí obdobné funkce jako vyhodnocení topologické optimalizace v programu Ansys.

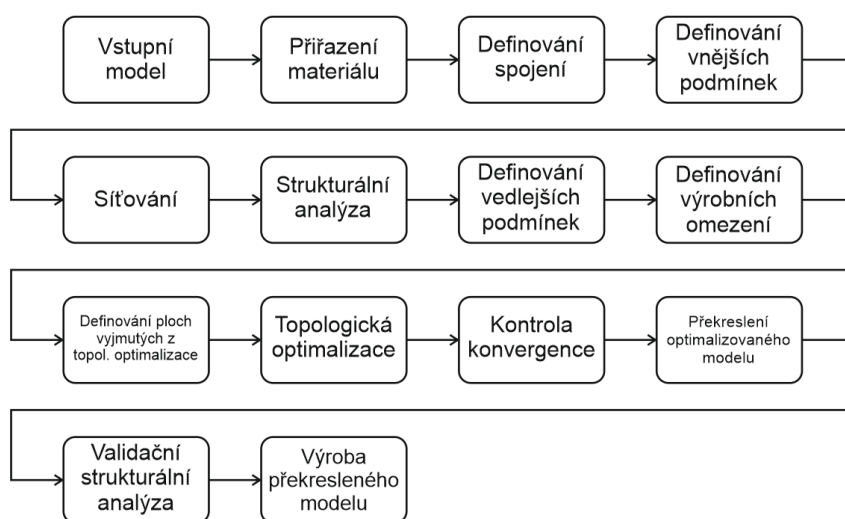
Graf „Material Mass“, stejně jako v případě topologické optimalizace v softwaru Ansys, umožňuje upravit množství zachovávaného materiálu, u kterého nezáleží, zda na modelu zůstane, či z něj bude odstraněn, přičemž tento výběr je možný pomocí táhla mezi krajními hodnotami „Heavy“ a „Light“. Krajní hodnota „Light“ označuje stav, kdy je odebrán veškerý materiál, který není nezbytně nutný pro dodržení žádaných vedlejších podmínek. Rozdílem oproti programu Ansys je možnost vyhlazení topologicky optimalizovaného modelu pomocí tlačítka (funkce) „Calculate Smoothed Mesh“.

Topologicky optimalizovaný objekt je možné exportovat v různých formátech. Možnost exportu je přístupná po stisknutí pravého tlačítka myši na grafu „Material Mass“ a výběru možnosti „Export Smoothed Mesh“. V základní variantě je možné vybrat mezi exportováním do současné konfigurace, čímž je myšleno exportování do aktivního projektu při zachování potlačení/nepotlačení určitých prvků projektu, nebo do nové konfigurace, čímž dojde k potlačení všech prvků aktivního projektu, kromě vyexportovaného objektu. Poslední variantou je exportování daného objektu jako nové samostatné součásti. V položce „Advanced Export“ je také možné vybrat, zda bude objekt exportován jako „Graphics Body“, „Solid Body“ nebo „Surface Body“. Možnost „Graphics Body“ je vhodná pro budoucí použití jako výkresu

například pro překrytí původní geometrie za účelem její snazší modifikace. Při „Solid body“ dojde k exportování ve formátu \*.sldprt, což je vhodné například pro 3D tisk. Poslední možností je exportování jako „Surface Body“, čímž dojde k vyexportování ve formátu STL. [18] Možnosti exportu v položce „Advanced“ mají pouze upřesňující charakter vůči základnímu nastavení exportování, přičemž v případě nenastavení dojde k automatickému exportování jako „Graphics Body“.

## 5 PŘÍKLADNÁ PROVEDENÍ TOPOLOGICKÉ OPTIMALIZACE V SOFTWARECH ANSYS A SOLIDWORKS

V této kapitole budou na dvou příkladných provedení demonstrovány možnosti topologické optimalizace v programu Ansys a v programu SolidWorks. Jak již bylo nastíněno výše, průběh topologické optimalizace by měl být přibližně takový, jak je možné vidět na diagramu na obrázku 5.1. V prvním příkladném provedení budou provedeny všechny kroky kromě vytvoření překresleného modelu. Ve druhém příkladném provedení budou provedeny pouze kroky po krok kontroly konvergence.



Obrázek 5.1 Diagram postupu topologické optimalizace

### 5.1 První příkladné provedení topologické optimalizace

V této podkapitole budou na prvním praktickém příkladu provedení demonstrovány možnosti topologické optimalizace v obou programech. Cílem prvního praktického příkladu bude získat optimalizovaný model konstrukce designového osvětlení s LED zdroji použitelného například pro rovnoměrné osvětlení pracovního stolu, a to s co nejlepším poměrem váhy k tuhosti a s maximální vahou odpovídající již vytištěné referenční konstrukci designového osvětlení, viditelné na obrázcích 5.2a a 5.2b. Celá konstrukce má vnitřní průměr 125 cm a skládá se z 16 dílů tvořících půlkruh. Konstrukce je rozdělena do šestnácti totožných dílů z toho důvodu, že jednotlivé díly budou vytištěny na 3D tiskárně, která má určité limitní hodnoty ve vztahu k velikosti tisknutelného dílu, a není tak možné vytisknout celou konstrukci najednou. Vedlejší podmínky, které musí optimalizovaný model splňovat, vychází z hodnot naměřených pomocí simulace chování referenční konstrukce designového osvětlení se shodnými maximálními rozměry a se stejným rozdělením do šestnácti shodných dílů. Materiál, ze kterého budou jednotlivé díly vytištěny, je taktéž shodný s referenční konstrukcí a jedná se

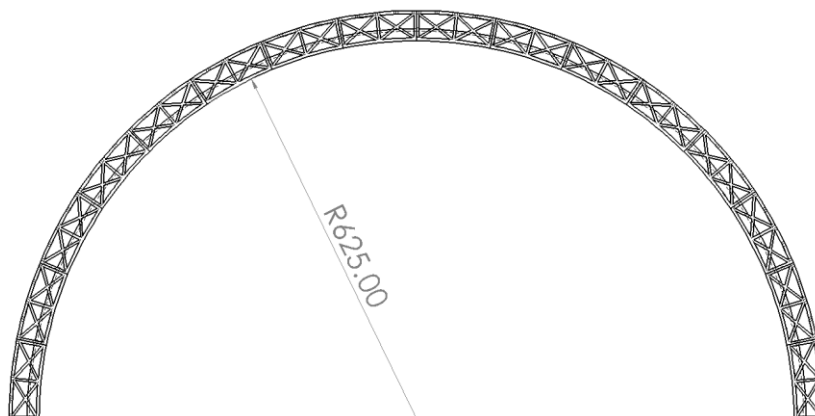
o materiál PLA, jehož hustota je  $1\,240\text{ kg/m}^3$ , hodnota modulu pružnosti ve smyku („Shear Modulus“) je  $1\,287\text{ MPa}$  a Poissonovo číslo je  $0,36$ .



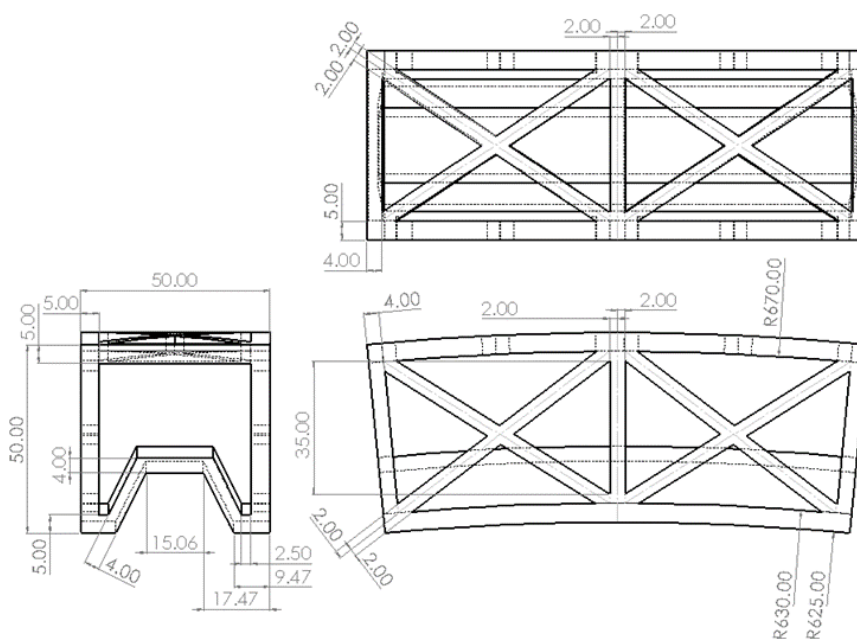
*Obrázek 5.2 Referenční konstrukce designového osvětlení a) celkový pohled, b) detail jednoho dílu*

Model referenční konstrukce designového osvětlení byl vytvořen pro potřebu dobrého osvětlení pracovního stolu při jemné řemeslné práci a jeho design byl vytvořen na základě inspirace tradičními mostními konstrukcemi. Nákres modelu této referenční konstrukce a nákres modelu jednoho dílu je možné vidět na obrázcích níže. Váha referenční konstrukce je rovna  $1\,337,3\text{ g}$ . Referenční konstrukce byla podrobena třem strukturálním analýzám v softwaru Ansys za účelem získání dat pro nastavení vedlejších podmínek topologické optimalizace. Při obou strukturálních analýzách bylo nastaveno pevné spojení čelních ploch prvního a posledního dílu. V případě první strukturální analýzy byla zadána pouze vnější podmínka působení gravitace. Z výsledků bylo pak zjištěno, že dle předpokladů dochází k největší deformaci ve směru osy Z, a to o velikosti  $29,901\text{ }\mu\text{m}$ . Z výsledků bylo dále zjištěno, že maximální globální ekvivalentní napětí dosahuje  $216,59\text{ kPa}$ . Druhá strukturální analýza byla prováděna z důvodu později zjištěného omezení topologické optimalizace v softwaru Ansys, které neumožňuje využití působení gravitace a dalších inerciálních vnějších podmínek, jako je například zrychlení, rotační rychlost nebo rotační zrychlení [15]. V případě druhé strukturální analýzy tak byla gravitace nahrazena první silou rovnající se váze modelu vynásobené gravitačním zrychlením, přičemž působení této síly bylo nastaveno na všechny vnitřní plochy. Dále byla zadána také druhá síla, která působila pouze na plochy „žlabu“, směřující kolmo do středu kruhu, a která odpovídá váze LED pásku vloženého do těchto žlabů vynásobené gravitačním zrychlením. LED páskem je RGB LED pásek s krytím IP65 a výkonem  $7,2\text{ W/m}$ . Váha LED pásku byla stanovena na přibližně  $42,6\text{ g}$  [27]. Z výsledků strukturální analýzy bylo zjištěno, že maximální celková deformace je rovna  $31,117\text{ }\mu\text{m}$ . Z výsledků bylo dále zjištěno, že maximální globální ekvivalentní napětí dosahuje  $282,09\text{ kPa}$ . Třetí strukturální analýza byla prováděna za účelem získání dat pro ověření vlastností optimalizovaného modelu při působení reálných podmínek. Třetí strukturální analýza je tak podobná první strukturální analýze s tím rozdílem, že byla k vnější podmínce gravitace dále přidána síla reprezentující LED pásek a která tedy odpovídá druhé síle z druhé strukturální

analýzy. Z výsledků strukturální analýzy bylo zjištěno, že maximální celková deformace je rovna 30,856  $\mu\text{m}$ . Z výsledků bylo dále zjištěno, že maximální globální ekvivalentní napětí dosahuje 283,4 kPa.



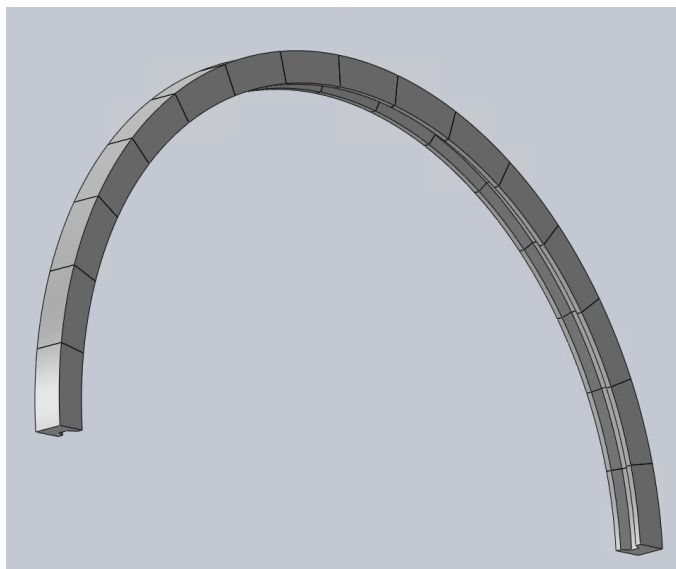
Obrázek 5.3 Náčes referenční konstrukce designového osvětlení



Obrázek 5.4 Náčes jednoho dílu referenční konstrukce designového osvětlení

Jak již bylo řečeno výše, jako vstupní model topologické optimalizace byl zvolen model, jehož vnější rozměry odpovídají vnějším rozměrům referenčního modelu, avšak na rozdíl od referenční konstrukce je objem vstupního modelu plný. Vstupní model je možné vidět na obrázku 5.5. V první iteraci byla zkušebně provedena topologická optimalizace jednoho dílu konstrukce v softwaru SolidWorks, avšak dle předpokladů nedošlo při sestavení celé konstrukce z takto optimalizovaných dílů ke splnění vedlejších podmínek stanovených referenční konstrukcí. Důvodem bylo, že v tomto softwaru není možné definovat vnější

podmínky, které působí mezi jednotlivými díly, a proto byla definována pouze vnější podmínka gravitace, což je pro akceptovatelný výsledek topologické optimalizace nedostačující.



*Obrázek 5.5 Vstupní model topologické optimalizace*

Ve druhé iteraci proběhla topologická optimalizace v softwaru Ansys, kde byla jako vstupní model použita celá konstrukce, přičemž topologická optimalizace byla prováděna pouze na jednom prostředním dílu a zbylé díly byly z topologické optimalizace vyloučeny. Dále zde byla nastavena vnější podmínka gravitačního zrychlení a vedlejší podmínka maximálního posuvu aplikovaná na jednu z vnitřních ploch optimalizované části konstrukce, přičemž velikost maximálního posuvu ve směru osy Z byla rovna  $29,901\ \mu\text{m}$ . Optimalizovaný díl byl následně překreslen v programu SolidWorks a z překresleného dílu byla vytvořena celá konstrukce designového osvětlení. Následnou strukturální analýzou v softwaru Ansys bylo zjištěno, že takováto konstrukce opět nesplňuje vedlejší podmínky dané referenční konstrukcí. Důvodem bylo to, že topologická optimalizace probíhala pouze na jednom dílu s konkrétním umístěním v sestavě, přičemž na každý díl konstrukce působí jiné síly, a proto je zřejmé, že nelze topologickou optimalizaci konstrukce tímto způsobem zjednodušit. Tento důvod byl prokázán i při sestavení konstrukce sestávající z optimalizovaného dílu umístěného ve středu konstrukce a doplněného zbylými neoptimalizovanými díly, kdy při následné strukturální analýze došlo ke splnění vedlejších podmínek. Je však nutné konstatovat, že tento výsledek je pouze náhodný, jelikož jak již bylo řečeno výše a jak bylo zjištěno při jedné z následujících iterací, topologická optimalizace v softwaru Ansys nebere v potaz vnější podmínku gravitace.

Při třetí iteraci byla topologická optimalizace prováděna se stejnými vnějšími a vedlejšími podmínkami jako druhá iterace, avšak byla prováděna na celém modelu konstrukce designového osvětlení. Výsledek topologické optimalizace byl v tomto případě velmi podobný jako v první iteraci, přičemž při bližší analýze bylo zjištěno, že příčinou takového výsledku je již zmíněné omezení gravitačního zrychlení.

Při čtvrté iteraci byla nahrazena vnější podmínka gravitace vnější podmínkou síly odpovídající velikosti první síly použité při druhé strukturální analýze referenční konstrukce a působící taktéž na všechny vnitřní plochy. Zároveň byla doplněna také druhá síla působící na „žlab“ konstrukce, přičemž její velikost odpovídala velikosti druhé síly působící na referenční konstrukci. Dále byla upravena vedlejší podmínka maximálního posuvu jedné z ploch středového dílu ve směru osy Z změnou velikosti na 31,117  $\mu\text{m}$ . Dále byla přidána druhá vedlejší podmínka, a to vedlejší podmínka maximální možné váhy, přičemž tato podmínka byla nastavena tak, aby výsledná váha odpovídala maximálně váze referenční konstrukce. Výsledkem byl topologicky optimalizovaný model, který splňoval druhou vedlejší podmínku, a lze se domnívat, že by splňoval také vedlejší podmínku maximálního posuvu. Tvar optimalizovaného modelu byl však jen velmi obtížně reprodukovatelný z důvodu nekonstantnosti tvaru, a proto nebylo splnění vedlejší podmínky maximálního posuvu testováno a bylo přistoupeno k další iteraci.

Při páté a poslední iteraci bylo dodáno výrobní omezení „Cyclic“. Toto výrobní omezení je využitelné pro modely, které jsou symetrické okolo určité osy rotace, což je i případ tohoto příkladného provedení. Zadávanými parametry jsou zde osa rotace, kterou v tomto případě tvoří střed půlkruhu, a počet sektorů, které se mají opakovat. Je nutné poznamenat, že bez ohledu na to, zda určitý model tvoří pouze půlkruh nebo celý kruh, je počet sektorů počítán vždy z celého kruhu. Tím je myšleno, že například při požadavku rozdělení půlkruhového modelu na šestnáct sektorů je nutné zadat počet sektorů 32. Vstupní model byl dále rozdělen na dvě symetrické půlky za účelem urychlení průběhu topologické optimalizace, jelikož takovýmto rozdělením dojde ke snížení počtu konečných prvků přibližně na polovinu, a tím pádem i k výraznému snížení výpočetní náročnosti, a tedy času potřebného pro získání výsledku. Výsledek topologické optimalizace se zadaným počtem šestnácti sektorů je možné vidět na obrázcích 5.6a a 5.6b. Takto optimalizovaný model byl následně přibližně překreslen v programu SolidWorks, jak je to možné vidět na modelu na obrázku 5.7a a na nákresech na obrázcích 5.8 a 5.9. Překreslený model váží 838,4 g oproti 1 337,3 g u referenční konstrukce. Tento překreslený model byl následně podroben strukturální analýze se stejnými vnějšími podmínkami jako u třetí strukturální analýzy referenční konstrukce. Výsledek strukturální analýzy ukázal, že maximální deformace překresleného modelu je rovna 19,285  $\mu\text{m}$  oproti 30,856  $\mu\text{m}$  u referenční konstrukce, a maximální globální ekvivalentní napětí je 111,38 kPa oproti 283,4 kPa u referenční konstrukce. Je tedy patrné, že pomocí topologické optimalizace byl získán model s nižší hmotností a zároveň také lepším poměrem tuhosti ku váze objektu a byl tedy naplněn cíl prováděné topologické optimalizace. Vzhledem k naplnění žádaného cíle byl tento překreslený díl vytištěn pomocí 3D tiskárny a je možné jej vidět na obrázku 5.7b. Celá konstrukce designového osvětlení však byla z estetických důvodů vytištěna na základě referenční konstrukce.

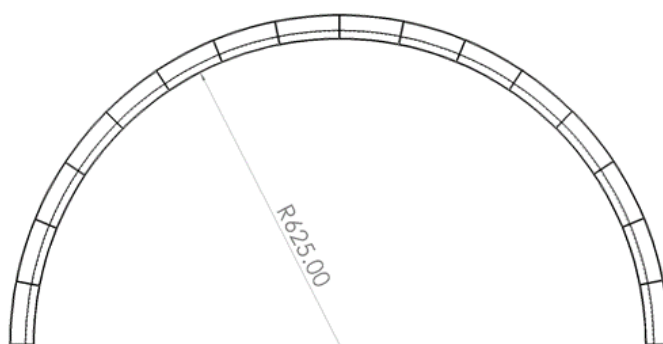




Obrázek 5.6 a) Topologicky optimalizovaný model páté iterace b) detail topologicky optimalizovaného modelu páté iterace

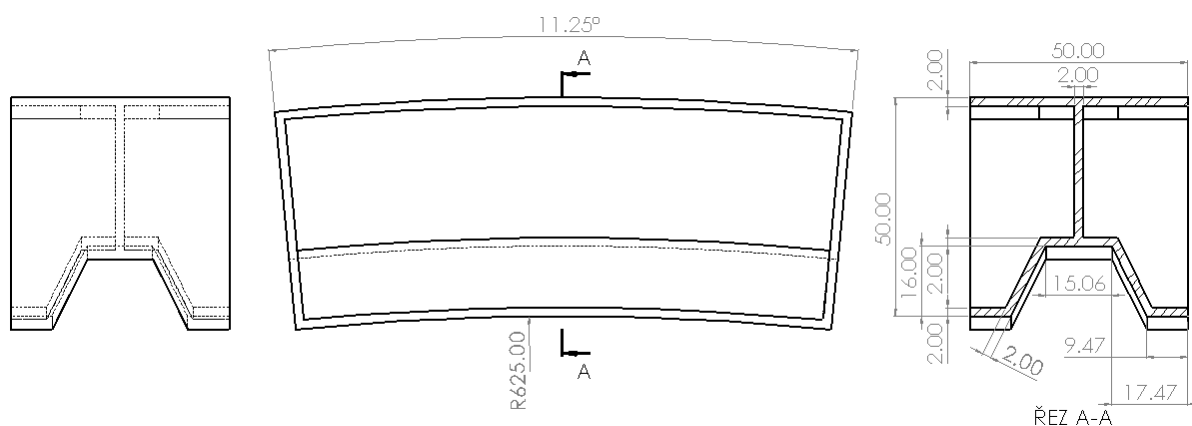


Obrázek 5.7 a) Překreslený model výsledku topologické optimalizace páté iterace b) vytištěný překreslený model výsledku topologické optimalizace



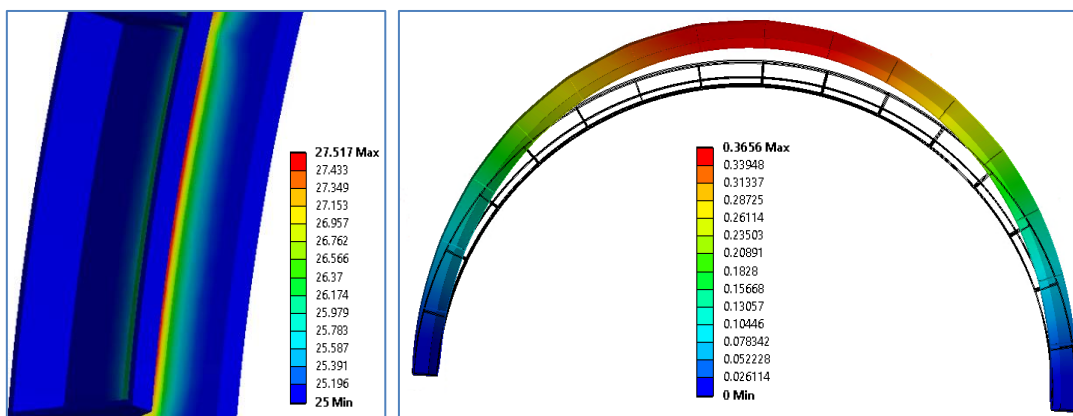
Obrázek 5.8 Nákres překresleného modelu výsledku topologické optimalizace páté iterace



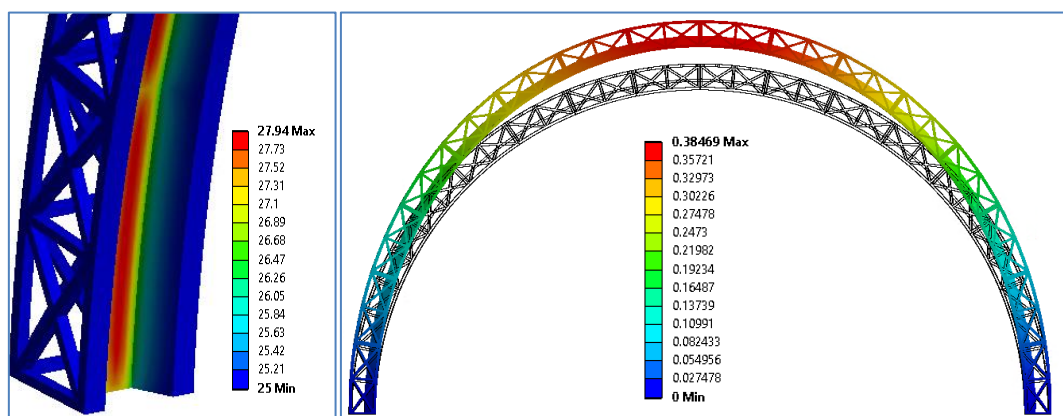


Obrázek 5.9 Nákres jednoho dílu překresleného modelu výsledku topologické optimalizace páté iterace

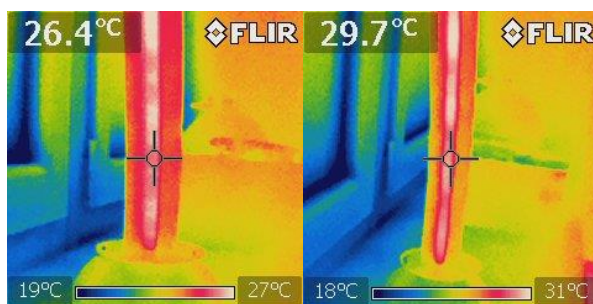
Na překresleném modelu a také na referenční konstrukci byly dále za použití prostředků softwaru Ansys, a to konkrétně za použití modulů „Steady-State Thermal“ a „Static Structural“, provedeny analýzy tepelného napětí (angl. „Thermal Stress Analysis“). Tyto analýzy byly provedeny za účelem analyzování teplotního působení LED pásku s výše popsány vlastnostmi na konstrukci designového osvětlení. Na plochu „žlabu“ každého dílu směřující kolmo do středu kruhu byl nastaven tepelný tok  $0,9\text{ W}$ , což přibližně odpovídá výkonu použitého pásku  $7,2\text{ W/m}$ , jelikož délka žlabu jednoho dílu je přibližně  $12,5\text{ cm}$ . Dále byla nastavena konvekce tepla do okolního vzduchu s tepelnou vodivostí  $5,5\text{ W/(m}^2\cdot^{\circ}\text{C)}$  a teplota okolního vzduchu byla nastavena na  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . S takto nastavenými parametry byly spuštěny analýzy překresleného modelu a referenční konstrukce. Výsledek analýzy tepelného napětí ukázal, že maximální teplota dosažená překresleným modelem je  $27,52\text{ }^{\circ}\text{C}$ , kdežto maximální teplota dosažená referenční konstrukcí je  $27,94\text{ }^{\circ}\text{C}$ , z čehož je patrné, že u překresleného modelu dochází k lepšímu odvodu tepla, a je tak zároveň prodlužována životnost LED pásku, jelikož dochází k menšímu zahřívání. Je také vhodné poznamenat, že se zároveň maximální teplota ani jednoho z modelů ani nepřibližuje teplotě skelného přechodu materiálu PLA, která je  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Detail rozložení teploty na jednotlivých modelech je možné vidět na obrázcích 5.10a a 5.11a. Dosažení dané teploty bylo také přibližně potvrzeno pomocí termokamery, jak je možné vidět na snímcích na obrázcích 5.12a a 5.12b, přičemž rozdíl oproti simulaci je dán obtížným nastavením správné emisivity. Tvzení o lepším odvodu tepla je také potvrzeno vyšší hodnotou tepelného toku u překresleného modelu, která činí  $43,21\text{ W/m}^2$  oproti  $36,72\text{ W/m}^2$  u referenčního konstrukce. Detail distribuce tepelných toků jednotlivých modelů je viditelná na obrázcích 5.13a a 5.13b. Z výsledků analýz bylo dále zjištěno, že maximální deformace vlivem působení tepla je u překresleného modelu  $365,6\text{ }\mu\text{m}$ , kdežto u referenční konstrukce je to  $384,69\text{ }\mu\text{m}$ , tedy přibližně o  $5\%$  více. Detailní rozložení deformace na jednotlivých modelech je možné vidět na obrázcích 5.10b a 5.11b. Ze všech uváděných parametrů je tedy patrné, že překreslený model vycházející z topologicky optimalizované konstrukce, kromě nižší váhy a lepšího poměru váhy k tuhosti, také lépe plní předurčenou funkci designového osvětlení.



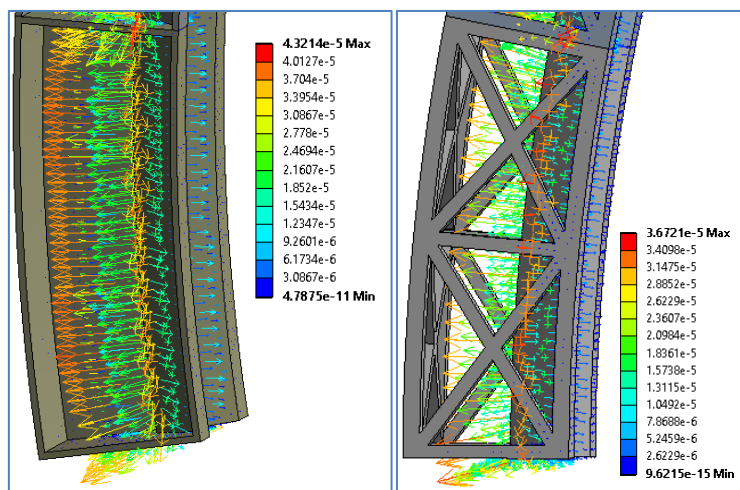
Obrázek 5.10 a) Detail rozložení teploty na překresleném modelu [°C] b) Deformace překresleného modelu vlivem působení tepla [mm]



Obrázek 5.11 a) Detail rozložení teploty na referenční konstrukci [°C] b) Deformace referenční konstrukce vlivem působení tepla [mm]



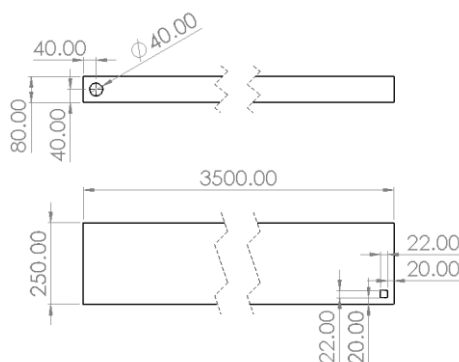
Obrázek 5.12 Snímky reálného rozložení teploty na referenční konstrukci



Obrázek 5.13 Detail distribuce tepelného toku na a) překresleném modelu [ $\text{W/mm}^2$ ] b) referenční konstrukci [ $\text{W/mm}^2$ ]

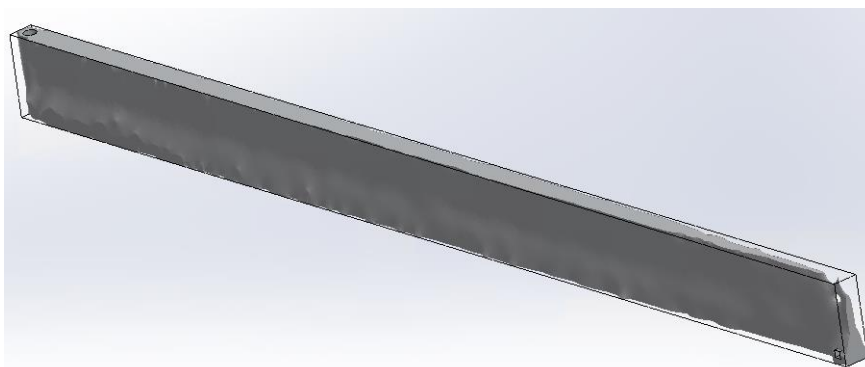
## 5.2 Druhé příkladné provedení topologické optimalizace

V této podkapitole budou na druhém příkladném provedení demonstrovány možnosti topologické optimalizace pouze v programu SolidWorks. Vstupní model druhého příkladného provedení byl záměrně zvolen tak, aby bylo možné topologickou optimalizaci provést, a to s ohledem na omezení programu SolidWorks týkající se nemožnosti provádění topologické optimalizace na sestavě. Zvolený model je viditelný na obrázku 5.14 a jedná se o model nosníku určeného pro zavěšení těžkého nástroje například na montážní lince. Materiál, ze kterého je nosník vyroben je hliníková slitina 6063 T5, jejíž hustota je  $2\,700\text{ kg/m}^3$ , hodnota modulu pružnosti ve smyku („Shear Modulus“) je  $25\,800\text{ MPa}$  a Poissonovo číslo je  $0,33$ . Váha tohoto nosníku je přibližně  $188\text{ kg}$ . V levé části tohoto modelu je z vrchu vyveden první otvor kruhového tvaru sloužící pro pohyblivé zavěšení nosníku na uchycení, které není součástí tohoto návrhu. V pravé části modelu je pak zepředu vyveden druhý otvor čtvercovitého tvaru, který slouží pro zavěšení nástroje vážícího  $15\text{ kg}$ .



Obrázek 5.14 Náčres modelu nosníku

Cílem, se kterým byla topologická optimalizace prováděna, bylo při dodržení stejné maximální deformace snížit váhu modelu o 50 %. Na základě strukturální analýzy, která předcházela topologické optimalizaci, bylo zjištěno, že hodnota maximální deformace u neoptimalizovaného nosníku je 3,912 mm. S ohledem na povahu prvního otvoru na něj bylo nastaveno spojení „Fixed Hinge“, které jak již bylo řečeno výše, umožňuje pouze translační pohyb modelu okolo osy prvního otvoru. Dále byla nastavena vnější podmínka síly působící na spodní stranu druhého otvoru, přičemž velikost této síly byla stanovena na 147 N, což odpovídá váze břemene přibližně 15 kg. Zároveň byla také nastavena druhá vnější podmínka, a to podmínka gravitačního zrychlení, jelikož topologická optimalizace v programu SolidWorks, na rozdíl od topologické optimalizace v programu Ansys, umožňuje využití této podmínky. Jako cíl bylo nastaveno dosažení co nejlepšího poměru váhy k tuhosti, přičemž povinná vedlejší podmínka množství odebrané váhy byla nastavena tak, aby bylo v souladu se stanovým cílem odebráno 50 % materiálu, takže výsledná váha by měla být přibližně 94 kg. Na základě stanoveného cíle topologické optimalizace byla nastavena také druhá vedlejší podmínka maximálního posuvu, a to na hodnotu 3,912 mm. Dále byly nastaveny podmínky výrobního omezení, a to konkrétně podmínka minimální tloušťky 2 mm, dále podmínka symetrie podle plochy protínající středu dvou párů protilehlých nejkratších hran, a jako poslední také podmínka směru vytažení z formy, která byla nastavena tak, že směr vytažení z formy je totožný se směrem nejkratší hrany. Pro síťování bylo využito standardní síť s rozměrem jednotlivých prvků 20 mm a tolerancí velikosti 1 mm. Zároveň nebylo využito možnosti „Automatic Transition“, jelikož bylo využito možnosti manuálního zjemnění sítě, a to jak uvnitř prvního a druhého otvoru, tak i na jejich hranách. Zjemnění bylo nastaveno tak, že maximální velikost prvku byla 5 mm a růstový poměr prvku byl 1,5. Výsledek topologické optimalizace po provedení zjemnění je možné vidět na obrázku 5.15. Dle konvergenčních grafů bylo zjištěno, že takto topologicky optimalizovaný objekt dosahuje váhy 94,23 kg a maximální deformace 18,274 mm. Vzhledem k tomu, že se jedná pouze o zkrácené příkladné provedení, nebyl tento model překreslen, a tím pádem ani nebyly validovány strukturální vlastnosti překresleného modelu. Takto získaný model by však bylo možné exportovat jako „Solid Body“ a využít jej pro 3D tisk či v tomto případě spíše pro subtraktivní metodu výroby. Na základě hodnot získaných z konvergenčních grafů lze předpokládat, že vyrobený model bude splňovat žádané parametry, a lze tedy konstatovat, že bylo dosaženo stanoveného cíle.



*Obrázek 5.15 Topologicky optimalizovaný model nosníku*

## 6 ZÁVĚR

V první části diplomové práce byla popsána aditivní a subtraktivní technologie výroby, přičemž větší důraz byl kladen na popis aditivní technologie výroby, kterou je i technologie 3D tisku. Ve druhé části pak byla obecně popsána topologická optimalizace, následovaná teoretickým popisem procesu topologické optimalizace, kde byly detailně rozebrány jednotlivé parametry, které je nutné nastavit před započítáním samotné topologické optimalizace. V závěru druhé části byly popsány tři různé metody, pomocí nichž je prováděna samotná topologická optimalizace.

Ve třetí části pak bylo popsáno provádění topologické optimalizace v softwaru Ansys. Kromě modulu topologické optimalizace byl ve třetí části práce zmíněn také modul strukturální analýzy, který tvoří v softwaru Ansys nedělitelnou část procesu topologické optimalizace, jelikož kromě speciálních případů musí být modul topologické optimalizace popsán způsobem napojen na modul strukturální analýzy. Čtvrtá část práce se zabývala prováděním topologické optimalizace v softwaru SolidWorks.

V páté, poslední, kapitole pak byla s využitím informací získaných v předchozích částech této práce provedena dvě příkladná provedení topologické optimalizace. V první podkapitole páté kapitoly byla topologická optimalizace provedena na příkladném provedení konstrukce designového osvětlení, a to jak v programu SolidWorks, tak v programu Ansys. Ve druhé podkapitole páté kapitoly byla topologická optimalizace provedena na příkladném provedení nosníku, a to pouze v programu SolidWorks.

Cílem topologické optimalizace v první podkapitole páté kapitoly bylo vytvoření modelu, který bude lehčí a zároveň bude mít lepší poměr váhy k tuhosti než již vytvořená referenční konstrukce designového osvětlení s totožnými vnějšími rozměry. V první iteraci byla prováděna topologická optimalizace v programu SolidWorks, avšak neúspěšně. Důvodem neúspěchu první iterace je značné omezení topologické optimalizace v programu SolidWorks, které neumožňuje provádět topologickou optimalizaci sestavy, ale pouze jediného dílu. Vzhledem k tomuto omezení tak není bez znalosti vnějších podmínek působících na určitý díl možné topologickou optimalizaci provádět. Ve čtyřech následujících iteracích, během nichž bylo upravováno vstupní nastavení topologické optimalizace, byla topologická optimalizace prováděna v programu Ansys. Během těchto čtyř iterací bylo zjištěno, že není možné topologickou optimalizaci zjednodušit tím způsobem, že by tato byla prováděna pouze na jednom dílu z šestnácti, které jsou shodné a které dohromady tvoří konstrukci designového osvětlení. Důvodem je, že na každý z dílů vzhledem k jejich rozdílným umístěním v sestavě působí různé síly, přičemž topologická optimalizace se snaží nalézt nejvhodnější řešení pro daný díl, a je tedy velmi pravděpodobné, že toto řešení bude odlišné, byť jen od sousedního dílu. Během těchto čtyř iterací bylo dále zjištěno omezení topologické optimalizace v softwaru Ansys spočívající v absenci možnosti využití působení gravitačního zrychlení. Toto omezení

bylo překonáno využitím síly působící na plochy konstrukce směřující do středu půlkruhu vytvářeného konstrukcí. Topologicky optimalizovaná konstrukce získaná pátou iterací byla následně překreslena a na překresleném modelu byla provedena strukturální analýza s cílem validace dodržení zadaných vedlejších podmínek. Během strukturální analýzy bylo potvrzeno, že překreslený model vycházející z topologicky optimalizované konstrukce splňuje jak cíl nižší váhy, kdy překreslený model váží pouze přibližně 63 % toho co referenční konstrukce designového osvětlení, tak i cíl lepšího poměru váhy k tuhosti. Tuhost je v této práci reprezentována především velikostí maximální deformace při působení gravitace a síly aplikované na „žlab“ konstrukce a reprezentující váhu instalovaného LED pásu. Velikost maximální deformace, kterou dosáhl překreslený model je přibližně 63 % velikosti maximální deformace, kterou dosáhla referenční konstrukce. Na základě těchto parametrů je patrné, že bylo dosaženo cíle topologické optimalizace. Z estetických důvodů však bylo, i přes tento výsledek, vyrobeno designové osvětlení dle prvního návrhu, v této práci označovaného jako referenční konstrukce.

V této podkapitole byla také provedena analýza tepelného napětí, a to jak na referenční konstrukci designového osvětlení, tak na překresleném modelu vycházejícím z topologicky optimalizované konstrukce dle páté iterace topologické optimalizace. Jako zdroj tepla byl použit vložený LED pásek s výkonem přibližně 7,2 W/m, jehož tepelný tok působí na plochy „žlabu“ směřující kolmo do středu půlkruhu tvořeného konstrukcí. Na základě vstupních parametrů pak bylo zjištěno, že překreslený model zároveň dosahuje, kromě naplnění výše uvedených cílů, také nižší maximální teploty, a to díky lepšímu odvodu tepla. Z výsledků analýz bylo dále zjištěno, že je maximální deformace vlivem působení tepla u překresleného modelu o 5 % nižší než u referenční konstrukce designového osvětlení.

Cílem druhé podkapitoly páté kapitoly bylo především předvedení možnosti topologické optimalizace v programu SolidWorks na takovém modelu, který bude topologickou optimalizací v tomto programu umožňovat, vzhledem k nemožnosti provádění topologické optimalizace sestav. Jako vhodný model byl tak zvolen nosník, jehož jedna strana byla upevněna tak, že umožňovala rotační pohyb okolo osy otvoru provedeném v nosníku, a na otvor na druhé straně modelu byla nastavena působící síla 147 N, což odpovídá břemenu vázícímu přibližně 15 kg. Cíl topologické optimalizace byl v tomto příkladném provedení nastaven tak, že bylo požadováno dosažení co nejlepšího poměru váhy k tuhosti, přičemž bylo zároveň požadováno odebrání 50 % materiálu a dosažení maximálně takové deformace, která se rovná velikosti deformace neoptimalizovaného modelu. Na základě hodnot získaných z konvergenčních grafů zobrazujících dosaženou váhu a deformaci modelu bylo zjištěno, že cíle topologické optimalizace bylo dosaženo, avšak vzhledem k tomu, že cílem druhé podkapitoly bylo pouze předvedení možností topologické optimalizace v programu SolidWorks, nebylo dále prováděno překreslení topologicky optimalizovaného modelu, a tím pádem ani validování jeho strukturálních vlastností.

## 7 BIBLIOGRAFIE

- [1] 4 axis CNC Router for sale with cost price. *StyleCNC* [online]. c2003-2018 [cit. 2018-10-27]. Dostupné z: <https://www.stylecnc.com/cnc-wood-router/4-axis-cnc-router.html>
- [2] 3D printing. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2018-10-28]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/3D\\_printing](https://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing)
- [3] Additive Manufacturing – a definition. *SPI Lasers* [online]. 2018 [cit. 2018-10-28]. Dostupné z: <https://www.spilasers.com/application-additive-manufacturing/additive-manufacturing-a-definition/>
- [4] All 10 Types of 3D Printing Technology in 2018. *All3DP* [online]. b.r. [cit. 2018-10-28]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/>
- [5] MAREŠ, Tomáš. *Základy konstrukční optimalizace* [online]. Praha: [Tomáš Mareš], 2006 [cit. 2018-11-03]. Knižnice konstrukční optimalizace. ISBN 80-239-6508-5. Dostupné z: <http://users.fs.cvut.cz/tomas.mares/z/z/ZakladyKonstrukcniOptimalizace/zko.pdf>
- [6] Introduction to Finite Element Analysis (FEA) or Finite Element Method (FEM). *University of Victoria: Faculty of Engineering* [online]. b.r. [cit. 2018-12-07]. Dostupné z: [https://www.engr.uvic.ca/~mech410/lectures/FEA\\_Theory.pdf](https://www.engr.uvic.ca/~mech410/lectures/FEA_Theory.pdf)
- [7] MIRZENDEHDEL, Amir. *A hands-on introduction to topology optimization*. Great Britain: [Amazon], 2017. ISBN 978-197-6480-607.
- [8] BENDSOE, Martin a Noboru KIKUCHI. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method. *Computer methods in applied mechanics and engineering*. Amsterdam: North-Holland Pub. Co., 1972, s. 197-224. ISSN 0045-7825.
- [9] Metoda SIMP pro optimalizaci topologie. *Dassault Systemes* [online]. © 1995-2018 [cit. 2018-11-11]. Dostupné z: [https://help.solidworks.com/2019/czech/SolidWorks/cworks/c\\_simp\\_method\\_topology.htm](https://help.solidworks.com/2019/czech/SolidWorks/cworks/c_simp_method_topology.htm)

- [10] ROZVANY, G. a Niels OLHOFF. *Topology optimization of structures and composite continua*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2000. ISBN 07-923-6807-X.
- [11] Ansys. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Ansys>
- [12] Skewness: Release 16.2. *SHARCNet* [online]. 2016 [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: [https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/wb\\_msh/msh\\_skewness.html](https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/wb_msh/msh_skewness.html)
- [13] SOLID186 Homogeneous Structural Solid Geometry. In: *SHARCNET* [online]. Ontario, 2016 [cit. 2019-02-24]. Dostupné z: [https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/ans\\_elem/Hlp\\_E\\_SOLID186.html](https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/ans_elem/Hlp_E_SOLID186.html)
- [14] SOLID187 Geometry. In: *SHARCNET* [online]. Ontario, 2016 [cit. 2019-02-24]. Dostupné z: [https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.0/en-us/help/ans\\_elem/Hlp\\_E\\_SOLID187.html](https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.0/en-us/help/ans_elem/Hlp_E_SOLID187.html)
- [15] ANSYS, INC. *ANSYS Mechanical User's Guide: Release 18.1*. USA, 2017.
- [16] MANGER, Philipp. Thrashing the Future of Design With Topology Optimization and Skateboard Trucks. In: *Autodesk* [online]. 2019 [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/redshift/skateboard-trucks-topology-optimization/>
- [17] SolidWorks. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2019-04-14]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/SolidWorks>
- [18] Topology Study. *SOLIDWORKS Help: version 2018* [online]. 2019 [cit. 2019-04-14]. Dostupné z: [https://help.solidworks.com/2018/english/SolidWorks/cworks/c\\_generative\\_design\\_study.htm?id=5ec83d3ced8a486fbe166718992230bc](https://help.solidworks.com/2018/english/SolidWorks/cworks/c_generative_design_study.htm?id=5ec83d3ced8a486fbe166718992230bc)
- [19] Analysis Solvers. *SOLIDWORKS Help: version 2018* [online]. c1995-2019 [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: [http://help.solidworks.com/2018/english/SolidWorks/cworks/c\\_Analysis\\_Solvers.htm](http://help.solidworks.com/2018/english/SolidWorks/cworks/c_Analysis_Solvers.htm)
- [20] RUEPP, Frank. Show degrees of freedom. *Dassault Systemes Solidworks Corp.* [online]. 2014 [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: <https://forum.solidworks.com/thread/13048>



- [21] TORDINI, Damon. Using the Right Mesh Type in SolidWorks Simulation. *Design Engineering* [online]. b.r. [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: <https://www.design-engineering.com/using-the-right-mesh-type-in-solidworks-simulation-124983/>
  
- [22] Curvature Based Mesh Advantages in SolidWorks Simulation. *Hawk Ridge Systems* [online]. 2019 [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <https://hawkridgesys.com/blog/curvature-based-mesh-advantages>
  
- [23] Mesh PropertyManager. *SOLIDWORKS Help: version 2018* [online]. b.r. [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: [http://help.solidworks.com/2018/english/SolidWorks/cworks/idc\\_help\\_meshsolid.htm](http://help.solidworks.com/2018/english/SolidWorks/cworks/idc_help_meshsolid.htm)
  
- [24] The New Blended Curvature-Based Meshing Algorithm. *Dassault Systèmes SolidWorks Corp.* [online]. 2019 [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <https://blogs.solidworks.com/tech/2016/09/new-blended-curvature-based-meshing-algorithm.html>
  
- [25] Meshing, Solvers, and Tips & Tricks. *The University of Sydney* [online]. 2016 [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: [http://web.aeromech.usyd.edu.au/MECH3460/Course\\_Documents/SWS%20professional%20manuals/tricks%20tips%20chpt.pdf](http://web.aeromech.usyd.edu.au/MECH3460/Course_Documents/SWS%20professional%20manuals/tricks%20tips%20chpt.pdf)
  
- [26] Is This a Good FEA Mesh? Here's How to Answer Yes, No, and All-You-Need-to-Know About Meshing Infographic. *Dassault Systèmes SolidWorks Corp.* [online]. 2019 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://blogs.solidworks.com/tech/2017/08/good-fea-mesh-heres-answer-yes-no-need-know-meshing-infographic.html>
  
- [27] LED pásek 30LED/m, RGB, 7,2W/m, IP20, 5 m. *GM electronic* [online]. 2019 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/led-pasek-30led-m-rgb-7-2w-m-ip20-5-m>

## 8 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1 Diagram tvorby výrobku subtraktivní technologií .....	8
Obrázek 1.2 Čtyř-osý CNC automat [1].....	9
Obrázek 1.3 Diagram tvorby výrobku aditivní technologií .....	9
Obrázek 1.4 Vytlačování materiálu [4] .....	11
Obrázek 1.5 VAT polymerizace [4] .....	12
Obrázek 1.6 Laserové spékání práškového materiálu [4] .....	12
Obrázek 2.1 Diagram tvorby výrobku aditivní technologií s využitím topologické optimalizace .....	14
Obrázek 2.2 Možný tvar držáku poličky .....	16
Obrázek 2.3 Možný tvar držáku poličky .....	16
Obrázek 2.4 Trojúhelník.....	19
Obrázek 2.5 Kvadratický trojúhelník .....	19
Obrázek 2.6 Čtyřúhelník .....	19
Obrázek 2.7 Kvadratický čtyřúhelník .....	19
Obrázek 2.8 Tetrahedron.....	20
Obrázek 2.9 Kvadratický tetrahedron .....	20
Obrázek 2.10 Hexahedron.....	20
Obrázek 2.11 Kvadratický hexahedron.....	20
Obrázek 2.12 Optimalizované rozložení hustot v zatíženém nosníku. [9].....	21
Obrázek 2.13 Rozložení hustot v zatíženém nosníku .....	22
Obrázek 3.1 Konečný prvek SOLID186 [13] .....	27
Obrázek 3.2 Konečný prvek SOLID187 [14] .....	27
Obrázek 3.3 Propojení modulu strukturální analýzy s modulem topologické optimalizace....	28

Obrázek 3.4 Nabídka modulu topologické optimalizace .....	28
Obrázek 3.5 Nastavení „Analysis Settings“ .....	29
Obrázek 3.6 Přidané možnosti „Exclusion Region“ .....	30
Obrázek 3.7 Nastavení „Optimization Region“ .....	30
Obrázek 3.8 Nastavení vedlejší podmínka omezení posunu .....	32
Obrázek 3.9 Nastavení „Objective“ .....	32
Obrázek 3.10 Příklad konvergenčního grafu konvergované topologické optimalizace .....	33
Obrázek 3.11 Příklad konvergenčního grafu nekonvergované topologické optimalizace .....	33
Obrázek 3.12 Položka „Topology Density“ .....	34
Obrázek 3.13 Převedení výsledku topologické optimalizace .....	35
Obrázek 3.14 Pospojování jednotlivých modulů pro validaci výsledku topologické optimalizace .....	35
Obrázek 3.15 Biologická struktura části skateboardu [16] .....	36
Obrázek 3.16 Invertovaná topologicky optimalizovaná část mostní konstrukce .....	36
Obrázek 4.1 Přiřazení materiálu .....	39
Obrázek 4.2 Definování vlastního materiálu .....	39
Obrázek 4.3 Nastavení „Fixture“ - standardní spojení .....	40
Obrázek 4.4 Nastavení „Fixture“ – „Advanced“ .....	40
Obrázek 4.5 Možnosti externích zatížení .....	41
Obrázek 4.6 Možnosti cílů topologické optimalizace .....	41
Obrázek 4.7 Možnosti podmínek cíle „Best Stiffness to Weight Ratio“ .....	42
Obrázek 4.8 Možnosti vedlejších podmínek cíle „Minimize Maximum Displacement“ .....	43
Obrázek 4.9 Možnosti vedlejších podmínek cíle „Minimize Mass with Displacement Constraint“ .....	43
Obrázek 4.10 Výrobní omezení zachovávané plochy .....	44

Obrázek 4.11 Nastavení vlastností topologické optimalizace .....	45
Obrázek 4.12 Nastavení vlastností topologické optimalizace – záložka „Options“ .....	46
Obrázek 4.13 Nastavení „Mesh“ .....	46
Obrázek 4.14 Schématické znázornění konečných prvků zakřivené sítě [23] .....	47
Obrázek 4.15 Detailní informace o síti .....	49
Obrázek 5.1 Diagram postupu topologické optimalizace .....	51
Obrázek 5.2 Referenční konstrukce designového osvětlení a) celkový pohled, b) detail jednoho dílu.....	52
Obrázek 5.3 Nákres referenční konstrukce designového osvětlení.....	53
Obrázek 5.4 Nákres jednoho dílu referenční konstrukce designového osvětlení.....	53
Obrázek 5.5 Vstupní model topologické optimalizace .....	54
Obrázek 5.6 a) Topologicky optimalizovaný model páté iterace b) detail topologicky optimalizovaného modelu páté iterace .....	56
Obrázek 5.7 a) Překreslený model výsledku topologické optimalizace páté iterace b) vytištěný překreslený model výsledku topologické optimalizace .....	56
Obrázek 5.8 Nákres překresleného modelu výsledku topologické optimalizace páté iterace..	56
Obrázek 5.9 Nákres jednoho dílu překresleného modelu výsledku topologické optimalizace páté iterace.....	57
Obrázek 5.10 a) Detail rozložení teploty na překresleném modelu [°C] b) Deformace překresleného modelu vlivem působení tepla [mm] .....	58
Obrázek 5.11 a) Detail rozložení teploty na referenční konstrukci [°C] b) Deformace referenční konstrukce vlivem působení tepla [mm] .....	58
Obrázek 5.12 Snímky reálného rozložení teploty na referenční konstrukci .....	58
Obrázek 5.13 Detail distribuce tepelného toku na a) překresleném modelu [W/mm <sup>2</sup> ] b) referenční konstrukci [W/mm <sup>2</sup> ].....	59
Obrázek 5.14 Nákres modelu nosníku .....	59
Obrázek 5.15 Topologicky optimalizovaný model nosníku .....	60

## 9 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1.1 Způsoby 3D tisku [4] .....	11
Tabulka 2.1 Výběr možných tvarů konečných prvků .....	19
Tabulka 2.2 Srovnání metod topologické optimalizace .....	23
Tabulka 3.1 Kvalita konečných prvků v grafu „Skewness“ [12] .....	26